doi: 10.3969/j.issn.1002－0268.2013.06.021

基于大规模浮动车数据的城市道路网复杂度分析

何兆成[1]，庄立坚[1]，杨文臣[2]，佘锡伟[3]
（1. 中山大学 智能交通研究中心，广东 广州 510006；2. 同济大学 交通运输工程学院，上海 201804；
3. 网易公司，广东 广州 510000）

摘要： 针对现有浮动车技术应用研究中缺乏道路网络复杂度的定量分析，引入置信点的概念，提出了一种基于大规模浮动车数据的城市路网复杂度分析方法。利用该方法统计了路网中各路段的置信点分布情况和置信点的平均匹配距离，建立了城市路网复杂度模型。结合浮动车数据的预处理，提出了城市路网复杂度的分析流程。以广州市为例，分析了广州市全局路网和4类典型城市道路代表路段的复杂度。对于地图匹配算法实证研究中的指定路径，具体分析了其各组成路段的复杂度及其主要影响因素。

关键词： 交通工程；路网复杂度分析；置信点；浮动车数据；地图匹配
中图分类号： U491.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1002－0268（2013）06－0120－07

Analysis of Urban Road Network Complexity Based on Large-scale Floating Car Data

HE Zhao-cheng[1], ZHUANG Li-jian[1], YANG Wen-chen[2], SHE Xi-wei[3]
(1. Intelligent Transport Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China;
2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. NetEase, Guangzhou Guangdong, 510000, China)

Abstract: In the light of the fact that the quantitative analysis of urban road network complexity is unexplored in the application of floating car technology, the concept of confidence point (CP) is introduced, and an analytical method of urban road network complexity based on large-scale floating car data is presented. On this basis, the CP distribution of each road section and the average matching distance of CPs are analyzed, and the urban road network complexity model is established. Combining with the floating car data pre-processing, the analysis process of road network complexity is proposed. Taking Guangzhou for example, the complexity of the whole Guangzhou urban road network and 4 typical types of urban road section are analyzed, and the specific path for map matching empirical study is specifically analyzed to indicate the complexity of each road section on the path and the main influencing factors.

Key words: traffic engineering; road network complexity analysis; confidence point; floating car data; map matching

0 引言

浮动车技术在大城市交通管控、交通信息服务和营运车管理等领域已得到较广泛的应用[1－3]。浮动车数据和路网电子地图是它的2个基本输入，浮动车数据的特性和路网复杂度对该技术的应用范围和实施效果具有决定性的影响[4]。

路网复杂度对浮动车技术的影响主要体现在2方面：首先是对地图匹配的影响。现有的地图匹配算法的精度都是随着车辆行驶道路所在路网复杂度

收稿日期：2012－12－25
基金项目：广东省粤港关键领域重点突破项目（2011A011305002）；广东省科技计划项目（2012B010900012）
作者简介：何兆成（1977－），男，广东梅县人，博士，副教授.（hezhch@mail.sysu.edu.cn）

的增加而下降，而目前大部分地图匹配算法的研究中，几乎没有对其试验路径给出定量的复杂度分析，使得其他学者很难对其算法的优劣做出准确的判断。其次是对道路速度估算的准确性和置信度的影响。由于路网的复杂度直接影响到地图匹配的精度，而地图匹配的结果是道路速度估算的重要输入，因此必然会影响速度估算的准确性，而目前对基于浮动车的道路速度估算置信度的衡量一般是以可用于计算的数据量作为标准[4-5]，这类方法忽略了因不考虑路网复杂度造成的地图匹配误差对速度估算的影响。

在路网复杂度分析研究方面，Velaga 等将其试验路网简单地分为城市路网、郊区路网、农村路网[6]。Quddus 等在研究中将试验路网分为 3 种比例尺（1∶1 250，1∶2 500 和 1∶50 000）[7]。多数学者在关于浮动车和导航技术应用的研究中不考虑所采用路网的复杂度情况，或只对试验路网给出了简单的定性描述。对此，少数学者引进了复杂系统网络理论和模型定量分析交通路网的复杂度[8-9]。Watts 等提出了小世界网络模型[10]；Barabási 等提出了无尺度网络研究主城区公路网映射后的复杂网络特性[11]；周宏达等将复杂网络理论应用到重庆市主城区公路网络的复杂特征分析[12]；孙仁诚等则从复杂网络的角度分析了青岛市公交线路网络的统计特性[13]。但是，此类网络复杂度定量分析的研究仅依托路网自身的拓扑和几何特性[14-15]，未考虑因路网本身信息不完整导致的计算偏差，所提出的模型和方法在城市大规模路网复杂度分析的应用上具有局限性。

基于以上分析，本文提出了一种利用城市大规模浮动车数据的城市道路网复杂度分析方法。该方法以广州市构建的浮动车交通信息采集系统为基础，通过大规模浮动车数据的分析和处理，引入路段置信点的概念，建立城市道路网复杂度的计算模型，提出路网复杂度分析的算法流程，并以广州市为例，分析广州市全局路网和快速路、主干路、次干路、支路 4 类代表性城市道路的复杂度。同时，以地图匹配算法实证研究中选取的试验路径为例，分析该路径上各组成路段的路网复杂度及其主要影响因素。

1　基于置信点的城市道路网络复杂度建模

1.1　置信点

城市道路网中不同区域的路网复杂度不同。当车辆行驶的路段位于稀疏和低复杂度的路网时，一般的地图匹配算法均可正确地鉴别行驶路段。但是，当车辆在高复杂度的路网（如平行道路、交叉口、高架路和匝道等）上行驶时，匹配精度会大幅降低。为定量评估路网的复杂度，建立路网复杂度与匹配算法精度间的对应关系，引入置信点（Confidence Point，CP）的概念：当 1 个 GPS 定位点位于低复杂度的局部路网并且可以匹配到正确的路段上时，称该点为置信点[16]。为此，GPS 定位点 G 是 1 个 CP，必须满足以下任意 1 个条件（如图 1 所示）：

条件 1：G 的候选路段集中只包含 1 条路段；

条件 2：G 的候选路段集中有 2 条路段（l_i，l_j），2 条路段的夹角 η_{ij} 足够大（$\eta_{ij}\geqslant 60°$），且其中 1 条路段的匹配权重远大于另 1 条路段（$w_i \geqslant 4w_j$）。

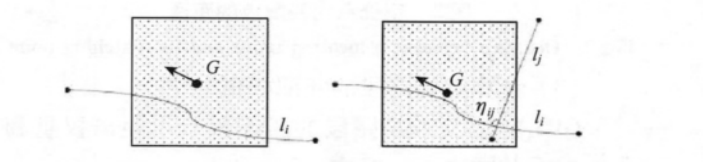

图 1　置信点判定的 2 个准则

Fig. 1　Two criteria for determining a CP

判定置信点的基本步骤为：

（1）筛选候选路段集

GPS 设备的定位误差和电子地图的误差将造成定位点的位置与车辆实际位置有所偏离，在定位点一定范围内的路段均可能成为该点的匹配路段。为此，可在定位点的邻近构建 1 个误差区域筛选潜在的匹配路段。研究采用矩形误差区域，构建方法如下：以 GPS 定位点为中心，构建 1 个边长为 $2L_{\max}$ 的正方形区域作为误差区域并与路网做交集，与误差区域交集不为空的路段均加入该 GPS 点的候选路段集，其中 $L_{\max}$ 是受各种因素影响的 GPS 定位点到路段的定位误差的最大值，研究选取 $L_{\max}$ 经验值[17] 为 70 m。

（2）计算定位点到匹配点的距离

假设 G 为 GPS 定位点，每个定位点包含坐标信息（x，y）。为计算定位点 G 到路段之间的距离，定义 G' 为 G 在路段 V_sV_e 上的投影点，则定位点到匹配点的距离按式（1）计算：

$$d(G,V_sV_e)=\begin{cases} d(G,G'), & G'\in [V_sV_e], \\ \min\{d(G,V_s),d(G,V_e)\}, & G'\notin [V_sV_e], \end{cases} \tag{1}$$

式中 d 为欧氏距离。路段方向的定义如下：当 $G'\in [V_sV_e]$ 时，匹配点为定位点到路段的投影点，匹配

点的方向是投影点 G' 沿道路的切线方向；而当 $G' \notin [V_o V_e]$ 时，匹配点为路段的某端点，假设匹配点为 V_o，需满足 $d(G, V_o) = \min [d(G, V_o), d(G, V_e)]$，匹配点的方向为路段 $V_o V_e$ 延长线的方向。以图 2 为例，G 到路段 CD 的匹配点为 G'_{CD}，匹配距离是 $d(G, CD) = d(G, G'_{CD})$；G 到路段 AB 的匹配点是 A，匹配距离是 $d(G, AB) = d(G, A)$。

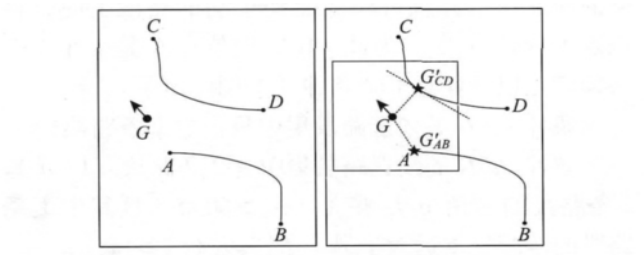

图 2 定位点到匹配点的距离

Fig. 2 Distance between a locating point and its matching point

(3) 计算点到路段的匹配权重

GPS 定位点到某路段的匹配权重由距离权重和角度权重共同决定，按式 (2) 计算:

$$w = \alpha \cos\left(\frac{\Delta\theta\pi}{180}\right) + \beta \frac{L_{\max} - d}{L_{\max}}, \quad (2)$$

式中，w 为候选路段的匹配权重；d 为 GPS 定位点到路段的投影距离；$\Delta\theta$ 为车辆航向和路段之间的夹角，由于大部分路段是双向的，$0° \leqslant \Delta\theta \leqslant 90°$；$\alpha$、$\beta$ 分别为角度权重系数和距离权重系数，且满足 $\alpha + \beta = 1$，权重系数与浮动车运行状态相关，可通过统计大量置信点的分布分别建立其与 GPS 点速度的关系[16]。

1.2 城市道路网络复杂度模型

根据置信点定义，当某路段位于稀疏和低复杂度的路网时，该路段出现的置信点概率高，反之亦然。据此，研究以路段置信点比例作为其所属路网复杂度的直接度量，路网 i 复杂度的计算模型如式 (3) 所示:

$$C_i = 1 - P_{i,\mathrm{cp}}, \quad (3)$$

式中，C_i 为路网 i 的网络复杂度；$P_{i,\mathrm{cp}}$ 为路网 i 的置信点比例，按式 (4) 计算:

$$P_{i,\mathrm{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^{m} N^j_{\mathrm{cp}}}{\sum_{j=1}^{m} N^j_G}, \quad (4)$$

式中，m 为路网 i 包含的路段总数；N^j_{cp} 为第 j 条路段包含的置信点数量；N^j_G 为第 j 条路段包含的 GPS 定位点数量。

1.3 道路网复杂度评估异常的判定

受时空资源限制，城市道路网的电子地图与实际路网并不完全一致，致使实际路网中存在的道路在电子地图上未能标出，如出租车聚集的非道路区域 (停车场、客运站和出租车公司等)。同时，浮动车数据存在 GPS 定位误差。受这些因素影响，基于大规模浮动车数据的道路网复杂度评估会出现异常，直接表现为目标路段置信点的平均匹配距离过大。为此，路网 i 的网络复杂度评估异常值 δ_i 按式 (5) 计算:

$$\delta_i = \mathrm{e}^{P_{i,\mathrm{cp}}} \frac{\overline{d_i} - L_{\max}}{L_{\max}}, \quad (5)$$

式中，$\overline{d_i}$ 为路网 i 所有置信点的平均匹配距离；$L_{\max}$ 为 GPS 定位点到路段的定位误差最大容许值，研究选取 $L_{\max}$ 经验值为 70 m，此时 δ_i 的值域为 $(-\mathrm{e}, 0)$。采用式 (6) 进行标准化后，δ_i 的值域变为 $(0, 1)$。其中，e 是自然对数的底，取值 2.718 28。

$$\delta_i = \frac{\delta_i + \mathrm{e}}{\mathrm{e}}。 \quad (6)$$

δ_i 越大表示路网 i 的网络复杂度评估出现异常的可能性越大。δ_i 值过大的原因分为 3 种: (1) 路网 i 包含的道路在实际路网中的地理位置与电子地图中标记的位置存在有较大的误差；(2) 路网 i 内存在其他通行道路，但未在电子地图中标记；(3) 路网 i 包含的道路附近存在出租车聚集的非道路区域。

2 城市道路网络复杂度分析流程

根据城市道路网络复杂度的定义，网络复杂度的分析过程等同于依托城市大规模浮动车数据的分析与处理来统计路网中不同路段置信点的分布比例和平均匹配距离的过程。为此，记录浮动车的每条 GPS 数据，基于置信点的城市道路网络复杂度分析流程如图 3 所示，具体步骤如下:

(1) 获取 1 条新 GPS 记录 G;

(2) 根据 G 的车牌号和 GPS 时间判断是否为重复数据，如 G 是重复数据则丢弃并转到步骤 (1)；

(3) 判断 G 的位置是否位于已经划定好的停车场区域 (包括一般停车场、客运站和出租车公司等)，如 G 位于停车场区域则丢弃，并跳转到步骤 (1)；

(4) 以 G 的位置为中心构造误差区域搜索候选路段集;

(5) 按式 (2) 计算 G 的位置到每一候选路段的匹配权重;

(6) 判断 G 是否为置信点，若 G 为置信点，则

往数据库写入该置信点及其匹配路段的记录，反之，则往数据库写入该非置信点及其所有候选路段的记录；

（7）跳转到步骤（1）。

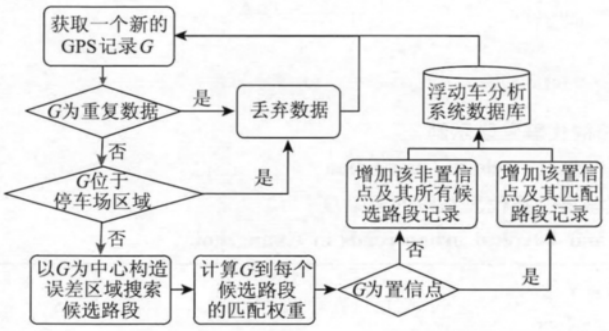

图 3　基于置信点的城市道路网络复杂度分析流程

Fig. 3　Flowchart of urban road network complexity analysis based on CP

3　应用举例

3.1　数据描述

（1）浮动车数据特性分析

研究以广州市逾 20 000 veh 安装了 GPS 定位设备的出租车作为大规模浮动车的数据源。出租车以一定周期向数据中心回传数据，在回传行驶状态信息（如位置坐标、航向，速度等）的同时，回传出租车运营中的事件（如上下客）及营运状态（如空驶、载客等）信息，详细记录出租车的实时行驶状态和运营状态。统计分析 2010 年 4 月 1 日 6:00—22:00 的广州市浮动车数据。分析结果如下：（1）全天共有 17 226 veh 出租车向交通信息中心回传了数据，共 31 275 582 条记录；（2）浮动车数据的采样时间间隔普遍较长且不固定，其中以 31 s 为采样间隔的数据量最高，占所有数据比例的 23.9%，其次是 20、60、30、120、40 s，不同采样时间间隔的数据分布如图 4 所示；（3）速度为零的数据占总数据量的 50.3%，速度在 150 km/h 以下的所有出租车数据的统计平均速度值为 16 km/h。浮动车非零速度的数据分布如图 5 所示。

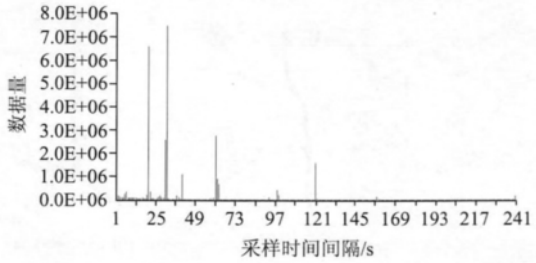

图 4　浮动车数据采样时间间隔的数据分布

Fig. 4　Distribution of sampling intervals of floating car data

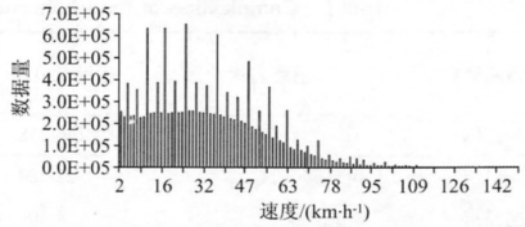

图 5　浮动车非零速度的数据分布

Fig. 5　Distribution of non-zero-speed floating car data

（2）城市道路网络电子地图

研究采用的广州市交通道路网络电子地图如图 6 所示。采用 2010 年 4 月 1 日的浮动车数据对该路网进行复杂度分析。路网主要特征如下：（1）整个路网共有 1 144 条道路，3 049 条路段，全长 1 166.958 km；（2）整个路网共分为 4 种道路类型，其中主干道 150 条，次干道 204 条，快速路 75 条，支路 715 条；（3）整个路网中的 3 032 条路段被浮动车数据所覆盖，浮动车数据覆盖率超过 99%。

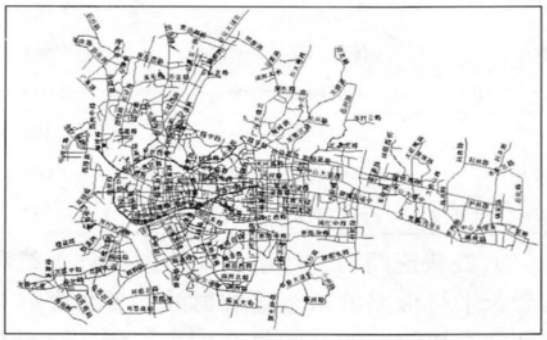

图 6　广州市道路网络电子地图

Fig. 6　Electronic map of Guangzhou road network

3.2　广州市城市道路网复杂度分析

统计分析广州市全局路网中被浮动车覆盖的所有路段置信点的分布情况和平均匹配距离，计算路网复杂度及其评估异常值。广州市全局路网和快速路、主干路、次干路、支路 4 种典型城市道路的代表路段及其复杂度分析分别如图 7 和表 1 所示。

从全局路网上看，广州市浮动出租车主要分布在城市主干道和次干道路段上。广州市道路网总体复杂度为 0.431，置信点的平均匹配距离为 13.96 m，总体路网复杂度评估异常值为 0.48。分析结果表明，广州市浮动车数据覆盖率高，总体路网复杂度处于中等水平，不同道路的复杂度存在一定的差异，总体路网复杂度评估的效果良好。具体而言：

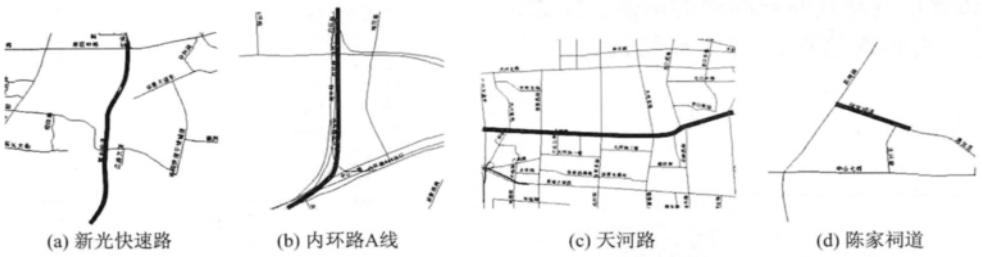

图 7 广州市 4 种典型道路的代表路段示例

Fig. 7 Representative sections of 4 typical roads in Guangzhou

表 1 广州市全局路网以及 4 种典型城市道路代表路段的复杂度

Tab. 1 Complexities of the whole road network and 4 typical urban roads in Guangzhou

道路类型	道路名称	道路长度/m	置信点平均匹配距离/m	置信点数量	C	δ
全局路网		1 166 958	13.96	6 845 078(56.90%)	0.431	0.48
快速路	内环路 A 线	22 780	40.58	2 314(4.08%)	0.959	0.84
	新光快速	4 504	10.32	23 800(92.24%)	0.776	0.61
	永福路放射线	547	25.39	381(8.78%)	0.912	0.74
主干道	机场路	7 885	18.15	179 532(58.21%)	0.418	0.51
	环市东路	3 788	12.81	132 790(58.66%)	0.413	0.46
	天河路	2 844	18.47	119 536(67.15%)	0.329	0.47
次干道	滨江东路	4 181	13.26	49 132(66.74%)	0.333	0.42
	体育东路	1 561	12.41	38 194(60.85%)	0.392	0.44
	下塘西路	2 032	8.19	36 618(63.81%)	0.362	0.39
支路	陈家祠道	192	15.24	20(45.45%)	0.546	0.55
	车陂西路	1 665	53.54	561(49.12%)	0.509	0.86
	陈田西街	532	7.63	275(42.50%)	0.575	0.50

(1) 在快速路中，环市高架的内环路 A 线和附近有较长平行道路的永福路放射线的复杂度都非常高，而新光快速路的路网复杂度则很低，原因在于新光快速路周边的路网稀疏。

(2) 表 1 列举的主干道和次干道的路网复杂度略低于全局路网的总体情况，而对于典型支路路段，其复杂度高于全局路网总体情况，同时由于出租车一般不选择城市的支路作为行驶道路，支路的浮动车数据覆盖率较低。

(3) 内环路 A 线和车陂西路的路网复杂度评估异常值均很大。调查对比分析结果表明，内环路 A 线、车陂西路周边存在出租车聚集的非道路区域，但这部分信息未在电子地图中标记完整。

3.3 指定路径复杂度分析

研究指定的 1 条试验路径如图 8 所示，路径总长度为 18 598 m，途经新港西路、昌岗东路、昌岗中路、工业大道北、南田路 A 线入口（匝道）、内环路 A 线、东华南路、中山一路、广州大道中和广州大道南。该路径包含了城市快速路、主干路和次干路等不同等级和复杂度的道路，是广州城市路网的缩影和典型。

图 8 试验路径

Fig. 8 Experimental path

试验路径途经路段的复杂度情况与几何特征描述如表 2 所示，该路径的置信点总数为 185 347 个，

置信点比例达 41.02%，路径的网络复杂度为 0.59，高于广州市的总体水平。具体分析如下：

（1）道路的网络复杂度与其单位长度内路口数存在一定的关联，单位长度路口数越多，道路对应的网络复杂度越高。

（2）道路网络复杂度影响最大的因素是道路附近是否存在平行路，道路是否为高架路或者道路是否为高架的下层道路。如果路段满足上述其中任意 1 种情况，路段的路网复杂度均很高。这是因为对于上述 3 类情况，电子地图上均会存在 1 条与该路段邻近且平行的道路，且该路段若是高架路和高架下层道路，电子地图中相关的 2 条路段将直接重叠，致使在这类道路上行驶车辆的置信点比例很低，道路的复杂度很高，对地图匹配算法的精度有很大的影响。

表 2　试验路径途经路段的几何特征

Tab. 2　Geometric characteristics of sections on experimental path

路名	长度/m	路口(包括匝道出入口)数量	单位长度路口数/(个·km)	是否存在平行路	是否高架路	是否高架下层	复杂度
新港西路	3 375	12	3.56	否	否	否	0.38
昌岗东路	811	4	4.93	否	否	否	0.6
昌岗中路	1 543	4	2.59	否	否	否	0.44
工业大道北	1 559	8	5.13	否	否	否	0.65
南田路 A 线入口	163	3	18.40	是	是	否	1.0
内环路(A)线	3 638	9	2.47	是	是	否	0.97
东华南路	1 590	14	8.81	是	否	是	1.0
中山一路	2 162	11	5.09	是	否	是	1.0
广州大道中	1 806	12	6.64	否	否	否	0.7
广州大道南	1 951	6	3.08	否	否	否	0.35

4　结论

本文提出了一种利用城市大规模浮动车数据定量分析城市道路网复杂度的方法。该方法依托大规模浮动车数据的处理与统计分析，定义了置信点比例与路网复杂度的对应关系，统计分析了城市路段上浮动车置信点的比例，进而建立了基于置信点比例的城市道路网复杂度模型，提出了道路网复杂度分析流程。以广州市为例，统计分析了广州城市全局路网和 4 类典型城市道路代表路段的路网复杂度和复杂度评估异常值。以地图匹配算法实证研究中选取的试验路径为示例，分析了该路径上各组成路段的路网复杂度及其主要影响因素。分析结果表明：广州市浮动车数据覆盖率高，且主要分布在城市主干道和次干道上；广州市总体路网复杂度处于中等水平，且不同道路的复杂度存在一定差异；路网复杂度主要受路段单位长度路口数、平行道路和高架道路 3 类因素影响。研究可为面向不同试验路径的地图匹配算法优劣的准确评估提供科学评判依据，为地图匹配算法选用合理的试验路径提供一定参考。

参考文献：

References:

[1] BRAKATSOULAS S，PFOSER D，TRYFONA N. Practical Data Management Techniques for Vehicle Tracking Data [C] // Proceedings of 21st International Conference on Data Engineering. Tokyo：IEEE，2005：324－235.

[2] TURKSMA S. The Various Uses of Floating Car Data [C] // Proceedings of 10th International Conference on Road Transport Information and Control. London：IEEE，2000：51－55.

[3] SCHAEFER R P，THIESSENHUSEN K U，WAGNER P. A Traffic Information System by Means of Real-time Floating-car Data [C] //Proceedings of 9th World Congress on Intelligent Transport Systems. Chicago：ERTICO，2002.

[4] SRINIVASAN K K，JOVANIS P P. Determination of Number of Probe Vehicles Required for Reliable Travel Time Measurement in Urban Network [J]. Transportation Research Record，1996，1537：15－22.

[5] 刘丽娜，吴建平，左兴权，等. 浮动车最小样本数量确定方法综述 [J]. 公路交通科技，2009，26（S1）：74－78.
LIU Li-na，WU Jian-ping，ZUO Xing-quan，et al. Review of Determining Minimum Sample Size of Probe Vehicles [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2009，26（S1）：74－78.

[6] VELAGA N R，QUDDUS M A，BRISTOW A L. Developing an Enhanced Weight-based Topological Map-matching Algorithm for Intelligent Transport Systems [J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2009，17（6）：672－683.

[7] QUDDUS M A，OCHIENG W Y，NOLAND R B. Integrity of Map-Matching Algorithms [J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2006，14（4）：283－302.

[8] WANG Wei，JIN Jing，RAN Bin，et al. Large-scale Freeway Network Traffic Monitoring：A Map-matching Algorithm Based on Low-logging Frequency GPS Probe Data [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems，2011，15（2）：63－74.

[9] 张昊，刘晓鸿，富立. 确定性地图匹配算法在车辆导航的应用和推广 [J]. 计算机应用研究，2004，21 (6)：117－119.
ZHANG Hao，LIU Xiao-hong，FU Li. Extension and Application of Certainty Measure Map Matching Algorithm in Car Navigation [J]. Application Research of Computers，2004，21 (6)：117－119.

[10] WATTS D J，STROGATZ S H. Collective Dynamics of "Small-World" Networks [J]. Nature，1998，393 (6684)：440－442.

[11] BARABáSI A L，ALBERT R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science，1999，286 (5439)：509－512.

[12] 周宏达，陈守刚，杨德刚. 主城区公路网的复杂网络特征分析 [J]. 成都大学学报：自然科学版，2009，28 (4)：342－345.
ZHOU Hong-da，CHEN Shou-gang，YANG De-gang. Feature Analysis of Complex Main Urban Road Networks [J]. Journal of Chengdu University：Natural Science Edition，2009，28 (4)：342－345.

[13] 孙仁诚，邵峰晶. 青岛市公交线路网络复杂性分析 [J]. 复杂系统与复杂性科学，2009，6 (3)：63－68.
SUN Ren-cheng，SHAO Feng-jing. Complexity of Qingdao's Public Transport Line Network [J]. Complex Systems and Complexity Science，2009，6 (3)：63－68.

[14] PORTA S，CRUCITTI P，LATORA V. The Network Analysis of Urban Streets：A Dual Approach [J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2006，369 (2)：853－866.

[15] JIANG Bin，CLARAMUNT C. Topological Analysis of Urban Street Networks [J]. Environment and Planning B：Planning and Design，2004，31 (1)：151－162.

[16] 佘锡伟. 面向城市路网中低采样率浮动车数据的在线地图匹配研究 [D]. 广州：中山大学，2012.
SHE Xi-wei. An On-line Map Matching Algorithm for Floating Car Data with Low Sampling Rate in Urban Road Network [D]. Guangzhou：Sun Yat-sen University，2012.

[17] OCHIENG W Y，QUDDUS M，NOLAND R B. Map-matching in Complex Urban Road Networks [J]. Brazilian Journal of Cartography，2004，55 (2)：1－18.

(上接第119页)

WANG Jing，SHAO Chun-fu，MAO Ke-jun. Bi-level Programming Model for Transfer Benefit of Public Transportation [J]. China Journal of Highway and Transport，2008，21 (2)：93－97.

[5] 袁虹，陆化普. 综合交通枢纽布局规划模型与方法研究 [J]. 公路交通科技，2001，18 (3)：101－105.
YUAN Hong，LU Hua-pu. Study on Model and Method of Comprehensive Transportation Terminal Planning [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2001，18 (3)：101－105.

[6] DENG Ju-long. Introduction to Grey System Theory [J]. The Journal of Gray System，1989，1 (1)：1－24.

[7] 谢乃明，刘思峰. 离散GM (1，1) 模型与灰色预测模型建模机理 [J]. 系统工程理论与实践，2005，25 (1)：93－99.
XIE Nai-ming，LIU Si-feng. Discrete GM (1，1) and Mechanism of Grey Forecasting Model [J]. Systems Engineering-Theory and Practice，2005，25 (1)：93－99.

[8] 陈淑燕，王炜. 交通量的灰色神经网络预测方法 [J]. 东南大学学报：自然科学版，2004，34 (4)：541－544.
CHEN Shu-yan. Grey Neural Network Forecasting for Traffic Flow [J]. Journal of Southeast University：Natural Science Edition，2004，34 (4)：541－544.

[9] 张晓南，刘安心，刘斌，等. 基于优化灰色神经网络模型的内燃机气缸套磨损量预测的研究 [J]. 汽车工程，2011，33 (9)：814－817.
ZHANG Xiao-nan，LIU An-xin，LIU Bin，et al. A Study on the Wear Prediction of Engine Cylinder Liner Based on Optimized Gray Neural Network Model [J]. Automotive Engineering，2011，33 (9)：814－817.

[10] ZHONG Luo. A Study on Gray Neural Network Modeling [C] // Proceedings of 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics，Beijing，China：IEEE，2002：2021－2023.

[11] 清华大学交通研究所. 兰州市综合交通规划道路网规划报告 [R]. 兰州：兰州市规划土地管理局，2003.
Transportation Engineering Institute of Tsinghua University. Report of Lanzhou Urban Comprehensive Transportation Planning and Road Network Planning [R]. Lanzhou：Lanzhou Land Management Bureau，2003.

[12] 汤旻安. 基于软计算融合的城市道路交通资源选址研究 [D]. 兰州：兰州交通大学，2011.
TANG Min-an. Locating for Urban Road Traffic Resources Based on Soft Computing [D]. Lanzhou：Lanzhou Jiaotong University，2011.