



地球科学
Earth Science
ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目: 基于模糊层次理论的城市群路网匹配模型构建及其应用
作者: 李朝奎, 李婷, 周新邵, 唐炉亮, 张新长, 胡焜豪
收稿日期: 2022-07-05
网络首发日期: 2023-03-07
引用格式: 李朝奎, 李婷, 周新邵, 唐炉亮, 张新长, 胡焜豪. 基于模糊层次理论的城市群路网匹配模型构建及其应用[J/OL]. 地球科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20230305.1749.004.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.3799/dqkx.2022.408

基于模糊层次理论的城市群路网匹配模型构建及其应用

李朝奎¹, 李婷^{1, 2}, 周新邵³, 唐炉亮¹, 张新长¹, 胡焜豪¹

(1. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南湘潭, 411201; 2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭, 411201; 3. 湖南城市学院信息与电子工程学院, 湖南益阳, 413000)

摘要: 随着国家城市群基础设施建设步伐的加快, 对城市道路网数据现势性的需求急剧增加。针对当前以位置和长度为主要参数的道路网匹配算法的不稳定性, 以及分析结果的不确定性和可靠性差等问题, 提出了一种新的基于模糊层次理论的路网匹配模型, 该模型通过融合多个评价指标进行构建, 并对其指标权重进行优化, 采用该模型对路网的一致性进行评价。以长株潭城市群道路网为实验对象进行实验验证。实验结果表明: 本文提出的匹配模型能够有效改善道路网匹配精度, 且具有较好的稳定性和可靠性。道路匹配的准确率和召回率分别达到了 92.9%和 86.2%, 比现有的典型匹配方法的 86.7%和 83.8%均有了显著提高。研究成果为道路网匹配与评价提供一种新的更为有效之方法。

关键词: 城市群; 道路网; 匹配模型; 模糊层次分析法; 长株潭

中图分类号: P208

收稿日期: 2022-07-05

Urban Road Network Matching Model Based on Fuzzy Hierarchy Theory and Its Application

Li Chaokui¹, Li Ting^{1,2}, Zhou Xinshao³, Tang Luliang¹, Zhang Xinchang¹, Hu Kunhao¹

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201, China; 2. College of Resources, Environment and Safety Engineering in Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201, China; 3. School of Information and Electronic Engineering, Hunan City University, Hunan Yiyang, 413000)

Abstract: With the acceleration of the infrastructure construction of national urban agglomeration, the demand for the current situation of urban road network data has increased sharply. Aiming at the instability of the current road network matching algorithm with location and length as the main parameters, as well as the uncertainty and poor reliability of the analysis results, a new road network matching model based on fuzzy hierarchy theory is proposed. The model is constructed by integrating multiple evaluation indexes, and the index weight is optimized. The model is used to evaluate the consistency of the road network. The road network of Changsha Zhuzhou Xiangtan Urban Agglomeration is taken as the experimental object for experimental verification. The experimental results show that the matching model proposed in this paper can effectively improve the matching accuracy of road network, and has good stability and reliability. The accuracy and recall of road matching have reached 92.9% and 86.2% respectively, which is significantly higher than 86.7% and 83.8% of the existing typical matching methods. The research results provide a new and more effective method for road network matching and evaluation.

Key words: Urban group; Road network; Matching model; Fuzzy hierarchy process; Chang-zhu-tan city group

基金项目: 国家自然科学基金(42171418)、湖南省自然科学基金创新群体项目(2020JJ1003)、湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2021GK4001)资助。

第一作者: 李朝奎(1967.9-), 男, 湖南汉寿人, 教授, 博士。研究方向: 三维地理建模及其应用。Email: chkl_hn@163.com

通讯作者: 李婷(1987.7-), 女, 湖南汉寿人, 高级工程师, 硕士。主要从事空间规划理论与方法研究。Email: 155405544@qq.com

0 引言

近年城市道路网数据的规模和结构在不断地发展变化,其更新成为新的研究热点。路网的现势性极大地影响了其作为决策支持的可靠性和应用价值,因此对道路网数据进行及时、准确的更新成为城市规划建设中的关键环节(胡永举等,2021;徐凯瑞等,2021)。国内外学者对城市道路网建设现状与规划目标的空间一致性分析、空间数据匹配质量评估等进行了大量研究,其中海量的道路网数据的现势性、准确性更具有长久、深远的研究价值(李豪,2020;董沈峰,2019)。

道路网匹配的实质是矢量线匹配,即识别不同数据源中表示同一条道路的空间要素。为了解决图像匹配及其应用问题,匹配技术被广泛应用于模式识别、计算机视觉等领域,这些技术包括迭代点分析评估、Hausdorff 距离度量、Chamfer 评价判断等。20 世纪 80 年代末,匹配技术开始运用于地理空间信息方面,经过几十年的发展,匹配算法在道路网更新中的应用成果丰硕。现有匹配算法大致可分为三类。第一类是根据形态的直接匹配算法,比如有路网的遥感影像、地图路线走势等数据;匹配算法街区合并混合整数规划模型对道路网弧段的相似度进行匹配,能够有效保持道路网中的格网模式特征(Xiong and Sperling, 2004; 栾学晨等,2014);蚁群算法求解模型是一种寻找全局最优的道路网同名实体匹配模型(巩现勇等,2014);基于多元 Logistic 回归的道路网匹配算法解决了匹配结果对单元变量过于依赖的问题(付仲良等,2016);直接匹配对于小范围的街景数据有很好的匹配合并效果,但是这种方法只考虑了道路的形态特征。第二类是根据多源数据进行拟合的数据,比如有 GPS 数据、周边建筑物场景数据、通过特定场景匹配推理的数据等;基于隐马尔可夫模型的道路网匹配算法提高了低频率采样的原始 GPS 数据匹配精度(吉宏梅,2020);基于地图场景和速度方向信息辅助的道路匹配方法有效提升导航起点位于商场、火车站等区域时道路匹配的准确

度(刘庆军等,2020);间接匹配可根据 GPS 信息以及周边特定建筑物进行更复杂的匹配,可面向多元并且复杂道路的识别,其中有好多借助人工智能和机器学习算法进行精准推理以达到匹配效果。第三类是混合模型数据,这类数据既有确定的影响,也有间接的数据。基于确定性地图匹配的新型地图匹配算法相对于不确定性地图匹配算法具有更高的匹配速度(邵天浩等,2020);改进的 D-S 证据推理地图匹配算法利用分布式融合模型进行改进,提高了交叉口道路的匹配准确率(李昊天,张宇,2020)。混合模型方法综合前两类的优点,降低了匹配的不确定性,大幅度提高了匹配精度。

总体来说,不同的应用场景有不同的匹配算法。上述匹配算法普遍是针对单一的“结点-弧段”进行匹配的,没有将道路看成一个有机的整体,且对于路网匹配相似性评价指标的权值通过人为的主观设定,因此上述方法限制了当前以位置和长度为主要参数的道路网匹配算法的稳定性,以及分析结果的确定性和可靠性等,对此本文提出基于模糊层次理论的城市道路网匹配模型,该模型把单条道路弧段通过 Stroke 方法连接成一整条道路并分级,利用模糊层次理论对各相似性评价指标的权值的重要性进行科学的排序和赋值,最后通过准确率和召回率对匹配结果进行评价。

1 城市路网匹配模型

1.1 道路网空间结构层次化表达

道路网之间的匹配机制复杂,使得道路网匹配过程中存在很多不确定性因素,增加了匹配工作的难度。为了减少匹配过程中一对多的现象,提高匹配准确率是一个主流的研究思路。道路 Stroke 方法使道路弧段连接为一整条道路(王培等,2019)。在进行处理时,根据格式塔视觉认知规则中的“连续性原则”,将具有相同方向的线要素利用首尾相连组成一条完整的 Stroke(ZHAI, 2011)。通常根据属性一致性、方向一致性和趋势一致性三种准则进行评定。随意选择一条弧段作为起始弧段,若和这条弧段相连接的其它弧段和它相契合,就把它们当作一

个整体，以这条弧段作为新的起始，进行遍历，提取全部符合条件的关联弧段融合成一条连贯的道路 Stroke（黄博华，2015）。

为了对生成的道路 Stroke 做进一步的空间分析应用，需进行等级划分。根据交通部《公路技术经济指标》规范文件，道路划分为国道、省道、县道、乡道。这种划分能够通过丰富的道路语义信息来对 Stroke 进行等级划分，而且针对许多语义信息缺省的 Stroke 数据，也可依据其它的结构特征对 Stroke 进行等级划分，例如连通度、紧密度和中介度三个拓扑结构特征指标对道路等级进行划分。

1.2 相似性评价指标的选取

在多源数据中，道路网数据的语义特征会受到术语表达的影响，分析起来很困难。在对琐碎的道路弧段构建 Stroke 连接时，需要把相同层级内的道路弧段按几何特征合并为一条完整的道路。这些道路弧段含有不同的属性信息，使用语义特征作为道路相似性评价指标来进行匹配会比较困难。因此本文选取位置、长度、方向、闭合面积相似性评价指标作为道路网匹配的评价依据（刘海龙等，2015）。

1.2.1 位置相似度指标及其度量

空间位置信息是体现空间要素空间特征的决定性因素，是实体要素空间表达的基础。理想状态下，同名道路在地理空间坐标系中的位置信息是完全吻合的，因此可以判断同名道路在地理空间坐标系中位置是邻近的。Hausdorff 距离能很好的体现同名道路间的整体距离（秦育罗等，2020）。如式（1）所示：

$$\Delta_{Locate}(Stroke) = 1 - \frac{Hausdorff(Str1, Str2)}{\Delta_{tolerance}} \quad (1)$$

式中： $\Delta_{Locate}(Stroke)$ 代表两条道路的位置相似性； $Hausdorff(Str1, Str2)$ 代表目标道路 Stroke1 和匹配道路 Stroke2 之间的 Hausdorff 距离， $\Delta_{tolerance}$ 代表距离阈值。

1.2.2 长度相似度指标及其度量

道路可以通过长度很直观地反映其尺

寸特征，道路的长度相似性通常利用两条线实体长度之比的最小值来进行计算。两条道路弧段的长度信息越相似，满足同名道路匹配的概率越高，因此道路长度特征的相似性度量可通过式（2）计算：

$$\Delta_{Length}(Stroke) = \frac{\min(L_{Stroke1}, L_{Stroke2})}{\max(L_{Stroke1}, L_{Stroke2})} \quad (2)$$

式中： $L_{Stroke1}$ 代表道路 Stroke1， $L_{Stroke2}$ 代表道路 Stroke2， Δ_{Length} 代表 $L_{Stroke1}$ 和 $L_{Stroke2}$ 的长度相似度， $\min()$ 代表获得最小值函数， $\max()$ 代表获得最大值函数。

1.2.3 方向相似度指标及其度量

描述矢量线状实体的另一个主要指标是方向特征。将道路 Stroke 的特征结点组织成新的线段，把各弧段长度与对应线段长的比值作为权值，对各弧段对应的线段与 X 轴正方向形成的夹角进行加权求值作为度量方向相似度的指标。如图 1 所示，道路 Stroke 对应的系数权值计算如式（3）所示：

$$\lambda_{rate} = \frac{C_n}{L} \quad (3)$$

式中： L 代表道路 Stroke 特征结点组成的线段长度， C_n 代表 L 对应的第 n 条弧段长度， λ_{rate} 代表其对应的系数权值。

计算整条道路 Stroke 加权方向均值，如式（4）所示：

$$\theta_{均值} = \lambda_1\theta_1 + \lambda_2\theta_2 + \dots + \lambda_n\theta_n \quad (4)$$

式中： λ_n 代表第 n 条线段的系数权值， θ_n 代表第 n 条线段与 X 轴正方向的夹角。

对两条道路 Stroke 之间方向均值进行求差，即可求出方向特征的相似性度量值，如式（5）所示：

$$\Delta_{orient}(Stroke) = 1 - \frac{\Delta\theta_{均值}}{\Delta\theta_{tolerance}} \quad (5)$$

式中： $\Delta\theta_{均值}$ 代表两条道路 Stroke 之间方向均值的差值，即 $\Delta\theta_{均值} = |\theta_{均值1} - \theta_{均值2}|$ ；

$\Delta\theta_{tolerance}$ 代表两条道路 Stroke 之间的方向均值差异阈值。

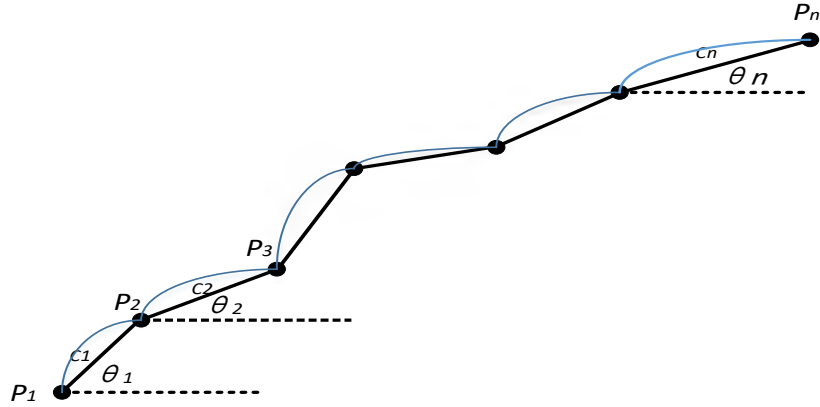


图 1 道路 Stroke 方向相似性度量

Fig1 Road Stroke direction similarity measure

1.2.4 闭合面积相似指标及其度量

(6)

闭合面积相似性通常作为道路网相似性评价约束的辅助指标（万洋洋，2016）。利用曲线的起始点连线将曲线变成一个闭合区域，如图 2 所示，通过计算两个闭合区域的重叠面积之比来获得闭合面积相似度，如公式（6）所示。

$$\Delta_{Area}(Stroke) = \frac{\min(S_{Stroke1}, S_{Stroke2})}{\max(S_{Stroke1}, S_{Stroke2})}$$

式中： $S_{Stroke1}$ 、 $S_{Stroke2}$ 分别代表 Stroke1 与 Stroke2 起始点连线与曲线形成闭合区域的面积， $\min()$ 代表获得最小值函数， $\max()$ 代表获得最大值函数。



图 2 道路 Stroke 闭合面积相似性度量

Fig 2 Similarity measure of closed area of road Stroke

1.3 基于模糊层次理论的道路网匹配模型构建

道路网匹配流程如图 3 所示，对规划道路数据源中单条道路 Stroke 做缓冲区，判断与现状道路数据源中道路 Stroke 的位置关系来快速筛选候选匹配集，对待匹配的道路 Stroke 和候选匹配道路 Stroke 进行相似度匹配计算，利用模糊-层次分析法对各相似性评价指标的权值的重要性进行科学的排序、赋值，对最终的整体相似度进行置信水平检测，判断两条道路 Stroke 是否匹配成功。

多源道路数据具有很大的不确定性，原本应该处于同一等级且存在匹配关系的

同名道路会被划分为不同等级。由于候选匹配集的筛选仅在同一级别数据源中筛选，因此会产生本该正确匹配的道路被划为无匹配对象。这时需要对无匹配道路进行全局遍历来补充检查，确定待匹配道路的真伪（张建辰等，2018）。如果存在匹配道路，则将其归入成功匹配集中；如果没有与之匹配的道路，则将该道路 Stroke 判断为新增道路或消亡道路。无匹配道路补充检查能够有效避免漏匹配，保证所有的道路都能进行正确的匹配。相关实验显示这种情况发生频率较低，不会对整个道路网匹配的效率产生较大影响。

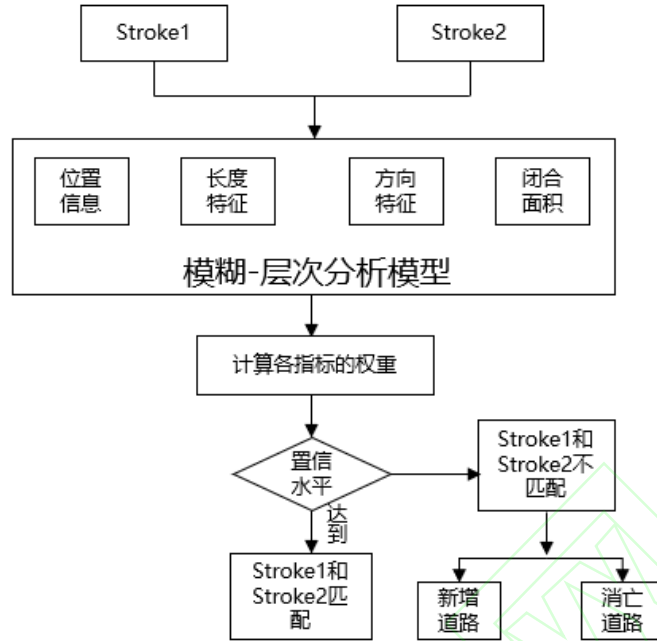


图3 道路 Stroke 匹配流程

Fig3 Road Stroke Matching Process

1.3.1 基于模糊层次理论的相似权值自动确定

相似性评价用到的评价指标很复杂，如何判断各个相似性评价指标权值的重要性成为了道路匹配的关键。构造一个多指标评价模型的主要环节是设置各个因子的权值，权重设置的合理性会严重影响评价模型的准确度。目前大多数匹配算法的权重通过人为的主观确定，降低了匹配算法的准确性（赵媛媛等，2007）。因此，构造一个合理的多指标相似性评价模型，提高匹配算法的准确性十分必要。本文利用模糊-层次分析法进行研究分析，采用该方法对多个相似性评价指标的重要性进行科学的排序、赋值，提升算法可靠性。

（1）相似指标重要性分析

目前大多数匹配算法的权重确定受主观因素影响，会对某些指标进行“强化”或者“弱化”的判断，因此必须对各相似性评价指标权值的重要性进行排序。在选取的4个相似性评价指标里面，道路网的位置特征是最为重要的特征，同时位置信息的变化也会对其他相似性指标产生影响。对道路网而言，确定了道路的空间位置信息，就基本明确了这条道路的空间特征。所以在众多相似性评价指标当中，位置特征的重要性最强。长度特征是对道路最直接的表达，重要性次之。方向特征主要表现了道路的趋势变化，重要性较弱。闭合面积特征反映了道路的大致形状，一般是约束性指标，重要性最弱。

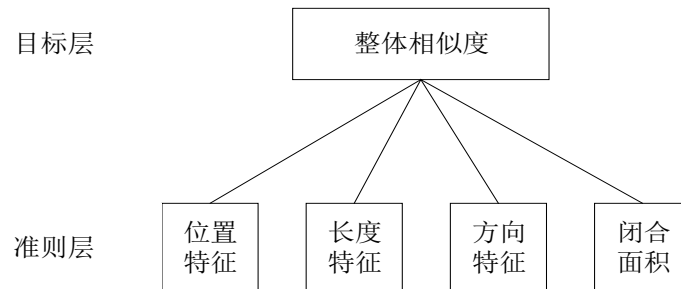


图4 道路网相似性评价指标层次模型

Fig4 Level model of road network similarity evaluation index

（2）相似指标层次分析模型构建

通过分析构建如图4所示的模糊-层次

分析模型。道路匹配的整体相似权值作为目标层 A，位置信息、形状特征、方向特征、闭合面积特征作为准则层 B，并分别用 B1、B2、B3、B4 表示。根据各相似性指标重要性分析结果，利用三标度指标权重赋值方法建立 A-B 优先判断矩阵，得到以下权值的相对重要性矩阵，如表 1 所示：

表 1 优先判断矩阵表

Tab1. Priority judgment matrix table

A	B1	B2	B3	B4
B1	0.5	1	1	1
B2	0	0.5	1	1
B3	0	0	0.5	1
B4	0	0	0	0.5

(3) 模糊判断矩阵计算结果

对于模糊判断矩阵，实施如下变换，构造 A-B 模糊一致阵：

1) 构造 A-B 层模糊一致阵，对模糊判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 按行求和，记 $r_i = \sum_{k=1}^n r_{ik}$ ($i=1,2,\dots,n$)，通过 $F = (f_{ij})_{n \times n}$ ，其中， $f_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5$ 变换得到如表 2 所示的矩阵：

表 2 模糊一致阵变换结果

Tab.2 Results of fuzzy uniform matrix transformation

A	B1	B2	B3	B4
B1	0.5	0.625	0.75	0.875
B2	0.375	0.5	0.625	0.75
B3	0.25	0.375	0.5	0.625
B4	0.125	0.25	0.375	0.5

2) 将 A-B 层次单排序，通过 $\bar{s}_i = \frac{s_i}{\sum_{j=1}^n s_j}$

($i=1,2,\dots,n$)，其中 $s_i = (\prod_{j=1}^n r_{ij})^{\frac{1}{n}}$ 进行计算，进而求出本层 B 因素对上层 A 某因素的重要性次序 $w_0 = (\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_n)$ ，即可获得各个指标的权值： $w_0 = (0.353, 0.285, 0.217, 0.145)$ 。最后通过公式 (7) 得出道路匹配的整体相似度为：

$$\text{Sim} = 0.353 \times \Delta_{\text{Locate}} + 0.285 \times \Delta_{\text{Length}} + 0.217 \times \Delta_{\text{Orient}} + 0.145 \times \Delta_{\text{Area}}$$

(7)

式中：Sim 代表路匹配的整体相似度， Δ_{Locate} 代表位置相似度， Δ_{Length} 代表长度相似度， Δ_{Orient} 方向相似度， Δ_{Area} 代表闭合面积相似度。

1.3.2 匹配结果质量评价

匹配结果的质量是整个匹配算法研究过程中的重要问题。一套匹配算法的优劣不仅要考虑算法的应用范围和平稳性，还需要对匹配结果的好坏进行评价。为评价本方法匹配结果的质量，本文选取了常用的两个定量评价指标：准确率 (precision) 和召回率 (recall)。

(1) 准确率 (P) 又称查准率，是指匹配结果中正确匹配的要素个数与匹配结果中总匹配对个数的比值，其算法如公式 (8) 所示：

$$P = \frac{f(C)}{f(C) + f(W)} \times 100\% \quad (8)$$

式中：f(C) 代表正确匹配数，f(W) 代表错误匹配数。

(2) 召回率 (R) 又称查全率，是指匹配结果中正确匹配的要素个数与数据中实际的正确匹配对的比值，其算法如公式 (9) 所示：

$$R = \frac{f(C)}{f(C) + f(U)} \times 100\% \quad (9)$$

式中：f(C) 代表正确匹配数，f(U) 代表漏匹配数。

匹配准确率是评价匹配算法对不存在匹配关系中的要素筛选的能力；匹配召回率是评价匹配算法对存在匹配关系的要素识别同名要素的能力。

2 实验及结果分析

2.1 实验数据

本实验选取长株潭地区的两幅 1:10000 道路网数据，分别为规划数据和实施现状数据，其中规划数据为 2015 年的道路网，实施现状数据为 2019 年的道路网。两幅道路数据涵盖了国道、省道以及县乡道路，此外为了更准确地进行道路网的匹配，本文将其中的高速公路的数据单独进行匹配，所以本次实验具有一定的准确性。进行匹配实验之

前，对两幅道路网数据进行预处理，处理结果如图 5（a），5(b)所示，此外统计了处理后的结点和弧段信息，如表 3 所示。

表 3 初始道路网数据要素统计结果

Tab3 Statistical results of data elements of initial road network

	初始数据		预处理后数据	
	弧段	结点	弧段	结点
	数量	数量	数量	数量
规划数据	2856	3358	2367	2614
现状数据	3267	3754	2849	3243

对数据进行预处理后，将规划数据和现状数据中的道路弧段进行 Stroke 连接处理，并对生成的道路 Stroke 进行分级。处理结果如图 5（c），5（b）所示，统计结果如表 4 所示。将两个数据源进行道路网叠加，结果如图 5（e）所示。从叠加的结果可以看出，两幅道路数据没有完全吻合，很多的道路在坐标位置或者结构上存在一定程度的不同，

此外数据中出现一些新增道路和消亡道路。

对选定的道路进行匹配，需要设置候选匹配集的缓冲半径，计算确定相似性指标及其权值。将计算的道路整体相似度与设置的匹配阈值进行比较，其相似值大于匹配阈值，则加入下一步判断的集合中，反之剔除。选取集合中整体相似性最大的作为匹配对象。根据实验结果调整分析，确定道路整体相似性阈值为 0.8。

表 4 道路网数据 Stroke 处理结果

Tab4 Stroke processing results of road network data

	预处理后数据		Stroke 构建结果
	弧段数量	结点数量	Stroke 数量
规划数据	2367	2614	507
现状数据	2849	3243	538



a)规划数据道路网展示



b)现状数据道路网展示

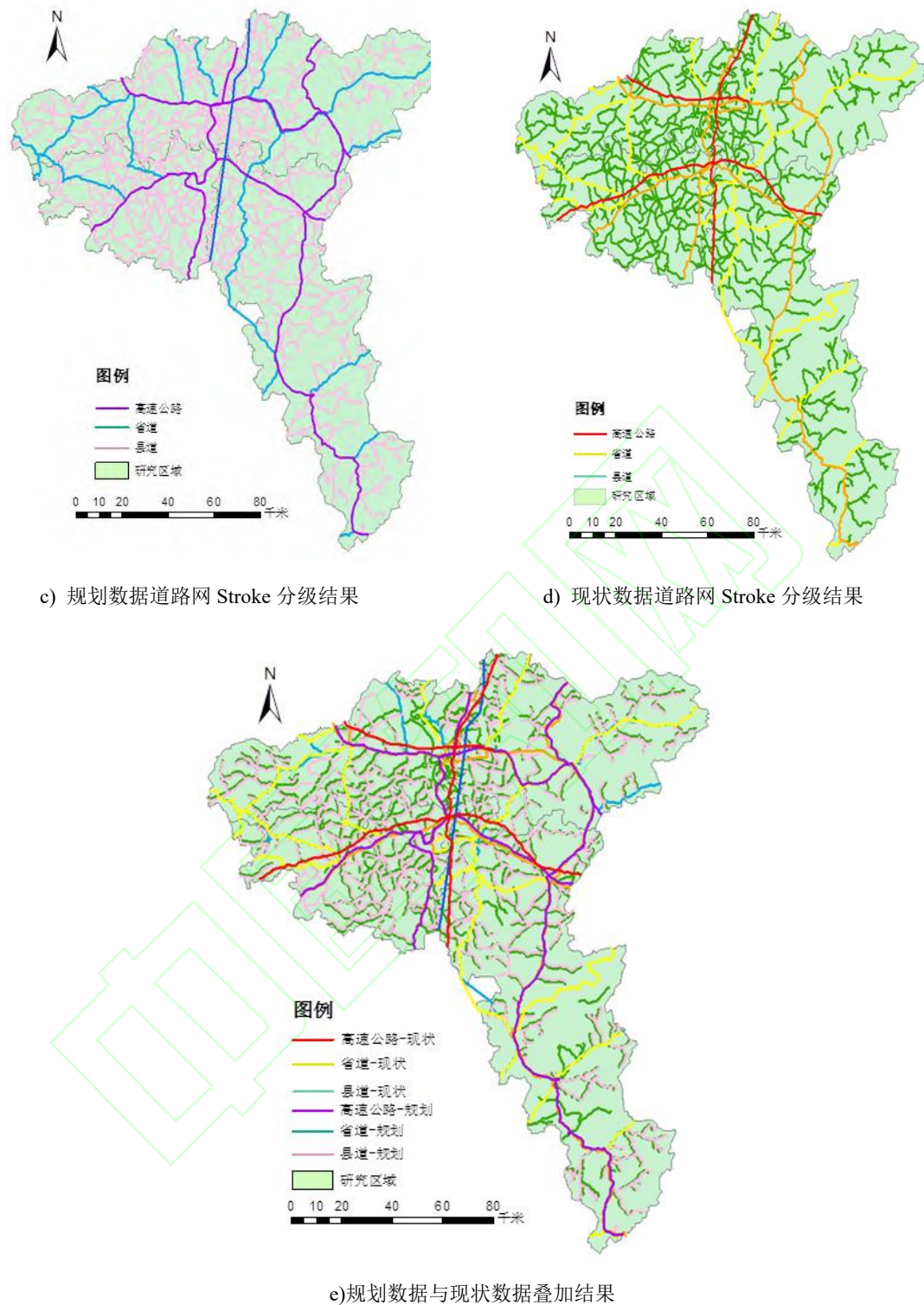


图 5 道路网数据层次化处理

Fig5 Hierarchical data processing of road network data

2.2 实验及结果分析

基于上述实验，使用不同时相的长株潭地区道路网数据验证本文所提出的道路网匹配方法的可行性，本次实验结果的最终匹配质量评估需要通过变化检测以及定量统计分析来进行判断。

2.2.1 道路网匹配

道路网匹配是实现道路变化检测的先决条件。基于模糊-层次分析模型的道路网匹配方法主要分为三步：①候选匹配集参数设置；②道路网相似指标的度量计算；③道路网整体匹配。本次实验中，搜索候选匹配

集的缓冲区半径设为 50 米。由于数据来源相同，不同时相的两份数据之间偏移小，从道路网整体性来看，匹配效果还是令人满意的，其正确率可达到 90%以上，匹配结果如图 6 所示。

2.2.2 道路网变化检测

道路网变化检测指对成功匹配的道路 Stroke 端点进行缓冲区分析来捕捉对应的匹配结点，从而根据道路 Stroke 所在的道路网数据集判断出新增道路或者消亡道路，检测结果如图 7 所示。



图 6 规划数据与现状数据匹配结果

Fig6 Source data matching results with target data

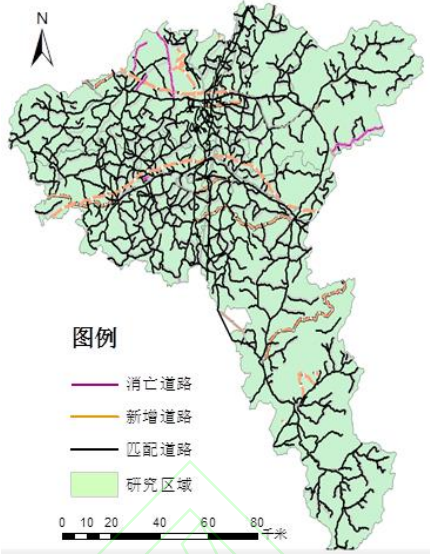


图 7 道路网变化检测结果

Fig7 Change detection results of road network

2.2.3 匹配结果质量分析

图 8 为从道路网匹配实验结果中选取的部分道路网数据匹配结果。可以看出，两幅图中的道路 Str7 在局部 (R9) 上具有很高的相似度，然而对于整体而言，其特征差异却比较大，利用 Hausdorff 距离进行计算，两条道路的位置相似性度量的距离比较明显；此外，在两条道路弧段的 R3 处的局部方向特征上也存在着较大的偏差；在混合多个相似性指标评价分析后认为两条道路的整体相似度不高，造成了错误匹配的情形。但这些都只是个别现象，由于无匹配的同名道路整体偏差比较明显，因此，通过人工比对能够立刻发现错误并进行修正。

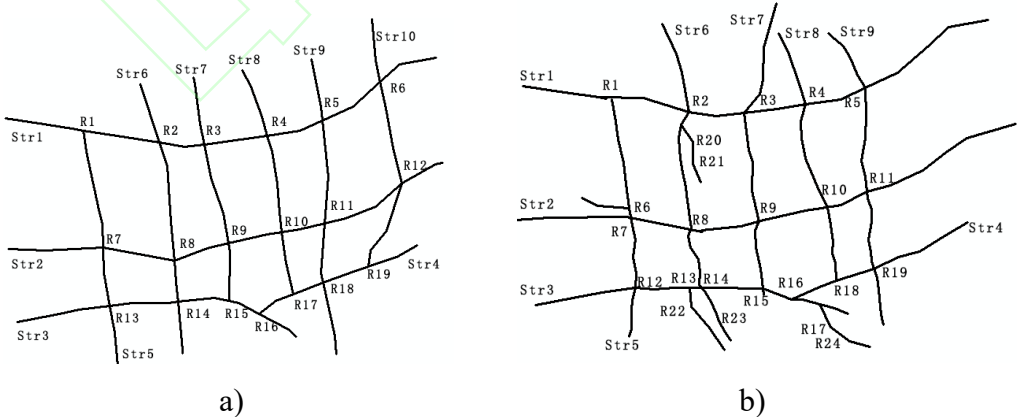


图 8 匹配错误线段图

Fig8 Schematic diagram of error phenomena in experimental results

为了验证本文模糊层次匹配方法对匹配结果的影响程度，分别采用结点-弧段匹

配方法和模糊层次匹配方法进行道路网匹配实验，两种方法匹配正确率统计结果见

表 5。

表 5 匹配结果统计表

Tab5 Quantitative statistical analysis of matching results

统计指标	正确匹配	错误匹配	漏匹配	匹配正确率 (%)	匹配召回率 (%)
结点-弧段匹配数量	4106	630	794	86.7	83.8
模糊层次匹配数量	421	32	67	92.9	86.2

匹配实验结果质量评价如表 5 所示。实验区域中本文所提方法的匹配正确率和召回率分别达到了 92.9%和 86.2%，而“结点-弧段”匹配方法的匹配正确率和召回率分别 86.7%和 83.8%。表明基于模糊层次法的匹配在效果上的表现较为优秀。

实验结果说明：道路进行了 Stroke 处理后将道路弧段连接为一整条道路，顾及了道路的完整性。利用模糊层次理论来自动确定各评价指标的权值减少了人为因素的影响；本方法按道路等级在候选匹配集中进行局部遍历查找同名要素，然后对未匹配要素进行全局遍历，相比于候选匹配集的全局筛选提高了匹配速率。

基于模糊层次理论的城市群道路网匹配模型不仅有较好的匹配准确率，同时由于匹配过程中只参考了道路的几何特征和拓扑特征，没有引入道路的语义特征指标，因此本方法具有较强的稳定性和适用性。

3 结论

针对当前以位置和长度为主要参数的道路网匹配算法的不稳定性，以及分析结果的不确定性和不可靠性等问题，提出了一种基于模糊层次理论的城市道路匹配模型。根据人类认识事物的规律，把单条道路弧段通过 Stroke 方法连接成一整条道路，并对其进行分级；引入位置、长度、方向、闭合面积等四个相似性特征指标对道路网整体的相似性匹配进行有效约束；利用模糊层次分析法对各相似性评价指标的重要性进行赋值；最后进行相似性评价并进行质量分析。采用准确率 P 和召回率

R 对匹配结果进行定量评估，以此对道路网匹配算法的准确性和可靠性进行表达。实验结果表明：

- （1）本文提出的匹配方法更符合人们的客观认知，有效改善了道路网匹配精度，且具有较强的稳定性和适用性；
- （2）对道路网现状空间数据与规划数据进行道路网络空间一致性匹配计算，既可以评价现状道路设施空间网络布局与规划的吻合度，又可以掌握道路规划项目实施的空间分布情况，以及与规划道路建设的吻合度，从而实现规划与实施结果的空间一致性评价；
- （3）研究成果可为后续综合交通规划方案完善、先挂标准的制定提供理论与方法依据。

References

Dong, S. F., 2019. Research on Road Network Matching Method Based on VGI Data. *Hunan University of Science and Technology*

Fu, Z. L., Zhao, X. Y. Yang, Y. W., et al.,2016. Road Networks Matching Using Multiple Logistic Regrssion. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2:171-177. doi:10.13203/j.whugis20150112

Gong, X. Y., Wu, f., Ji, C. W., et al.,2014. Ant Colony Optimization Approach to Road Network Matching. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2:191-195. Doi:10.13203/j.whugis20120649

Huang, B. H., 2015. Research on Matching Method of Urban Road Networks Based on Hierarchical Area Partitioning. *Information Engineering University*

Hu, Y. J., Chen, Y. M., Lan, G. C., et al., A Study of Capacity Matching to Urban Road Network. *Journal of Zhejiang Normal University(Natural Sciences)*, 44(2):206-211.

doi:10.16218/j.issn.1001-5051.2021.02.012

- Ji, H. M., 2020. Research on Road Network Matching Algorithm Based on Hidden Markov Model. *Shenyang Ligong University*
- Li, H., 2020. Research on Constructing Road Network Hierarchy Model and Its Application on Road Matching. *Information Engineering University*
- Luan, X. C., Yang, B. S., Li, Q. P., 2014. A Mixed Integer Programming Model of Block Aggregation for Grid Pattern Maintenance in Urban Network. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 4:426-434. doi:10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0063
- Li, H. T., Zhang, Y., 2020. Improved D-S Evidence Reasoning Map Matching Algorithm. *Journal of Northeast Electric Power University*, 40(1):90-96. doi:10.19718/j.issn.1005-2992.2020-01-0090-07
- Liu, H. L., Qian, H. Z., Wang, X., et al., 2015. Road Networks Global Matching Method Using Analytical Hierarchy Process. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 5:644-651. doi: 10.13203/j.whugis20130350
- Qin, Y. L., Guo, B., Sun, X. R., 2020. Improved Hausdorff Distance and Its Application in Multi-Scale Road Network Matching. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 37(3):313-318
- Shao, H. T., Zhang, H. J., Cheng, K., 2020. Map Matching Algorithm Based on Hash and Edge Weight of Road Network and Its Application. 30(8):140-146
- Wang, P., Zhao, J. X., Cui, H. P., et al., 2019. Method for Complex Road Matching Based on Road Skeleton Line Stroke. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 36(1):95-99
- Wan, Y. Y., 2016. The Matching Method Based on Voronoi Diagram for Multi-scale Polygonal Residential Areas. *Jiangxi Normal University*
- Xu, K. R., Wang, X. Y., Yao, X. Z., 2021. A Synergetic Development Analysis of Urban Road Accessibility and Construction Land—Take Luohe City as an Example. *Henan Science*
- Zhang, J. C., Wang, Y. H., Zhao, W. J., 2018. Matching Road Networks Based on Combination of Global and Local Optimization. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*
- Zhao, Y. Y., 2008. The Design And Implementation of a Tool For Patching Ontology Mapping. *Southeastern University*
- Zhai, R. J., 2011. Research on Automated Matching Methods for

Multi-scale Vector Spatial Data Based on Global Consistency Evaluation. *Information Engineering University*

附中文参考文献

- 董沈峰.基于 VGI 数据的道路网匹配方法研究.湖南科技大学,2019.
- 付仲良,杨元维,高贤君,等.利用多元 Logistic 回归进行道路网匹配.武汉大学学报(信息科学版),2016,41(2):171-177.
- 巩现勇,武芳,姬存伟,等.道路网匹配的蚁群算法求解模型.武汉大学学报(信息科学版),2014,39(2):191-195.
- 黄博华.基于层次化面域剖分模型的城市道路网匹配算法研究.解放军信息工程大学,2015.
- 胡永举,陈燕敏,蓝光晨,李玉梅.城市道路网通行能力匹配度研究.浙江师范大学学报(自然科学版),2021,44(2):206-211.
- 吉宏梅.基于隐马尔可夫模型的路网匹配算法研究.沈阳理工大学,2020.
- 李豪.路网层次结构模型构建与匹配技术研究.战略支援部队信息工程大学,2020.
- 梁学晨,杨必胜,李秋萍.保持城市道路格网模式的街区合并混合整数规划模型.测绘学报,2014,43(4):426-434.
- 刘庆军,罗军,张绍瑞,聂斌.基于地图场景和速度方向信息辅助的道路匹配方法.中国卫星导航定位协会、武汉市人民政府.卫星导航定位技术文集(2020).中国卫星导航定位协会、武汉市人民政府:中国卫星导航定位协会,2020:5.
- 李昊天,张宇.改进的 D-S 证据推理地图匹配算法.东北电力大学学报,2020,40(1):90-96.
- 刘海龙,钱海忠,王骁,等.采用层次分析法的道路网整体匹配方法.武汉大学学报(信息科学版),2015,40(5):644-651.
- 秦育罗,郭冰,孙小荣.改进 Hausdorff 距离及其在多尺度道路网匹配中的应用.测绘科学技术学报,2020,37(3):313-318.
- 邵天浩,张宏军,程恺,唐新德,莫斐,张可.基于哈希和路网边权的地图匹配算法及其应用.计算机技术与发展,2020,30(8):140-146.
- 王培,赵军喜,崔虎平,王玉晶.采用道路骨架线 stroke 的复杂道路匹配方法.测绘科学技术学报,2019,36(1):95-99.
- 万洋洋.基于 Voronoi 图的多尺度面状居民地匹配方法研究.江西师范大学,2016.
- 徐凯瑞,王鑫宇,姚新治,孙亚东,田国行.城市道路可达性与建设用地的协同发展分析——以漯河市为例.河南科学,2021,39(3):502-508.
- 张建辰,王艳慧,赵文吉.全局与局部寻优相结合的道路网匹配方法.武汉大学学报(信息科学版),2018,43(8):1166-1171.
- 赵媛媛,胡伟,瞿裕忠.一种基于邻居相似度寻找缺失匹配对的方法//2007 中国计算机大会.2007.