

基于耗费距离的公路网络路径分析模型研究 ——以珠江三角洲公路网为例

康 苹^{1,2}, 刘高焕¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 栅格数据模型的最优路径分析方法是在综合考虑通行时间、通行资费等多种影响因素的基础上, 通过计算最小累加费用值来确定最优路径。本文以珠江三角洲公路网为例, 系统介绍了公路网和公路行车速度的模拟技术, 以及基于栅格等级公路网的最小行车时间及行车资费的分析方法, 并计算珠江三角主要城市间的最短行车路线。

关键词: 公路网络; 耗费距离栅格; 方向栅格; 累积耗费距离; 最优路径分析

1 引言

目前, GIS公路路径分析^[1]分为基于矢量节点和基于耗费距离栅格两种^[2]。较之基于矢量节点的路径分析, 耗费距离栅格的最优路径分析具有数据结构简单、无需建立复杂的拓扑关系和进行复杂的拓扑运算、处理速度快等特点。尤其是遥感数据通常是以栅格数据存储的, 基于栅格的最优路径分析可以直接利用遥感图像进行分析和计算, 而不需要转换数据格式^[3]。交通道路网络模型的研究通常是和城镇体系研究联系在一起的^[4~7], 许多研究都是对面域的研究, 例如交通可达性研究、交通设施优化布局研究、城镇或基础设施辐射范围研究等, 此类研究均需对研究范围内的所有地点进行模拟分析, 而不仅仅局限于路网上的点和线。由于栅格数据能够以栅格点的形式准确地描述研究范围内的任何地点, 因此建立基于耗费距离栅格的公路网络路径分析模型可以有效地提高道路交通和城镇体系研究的精度。

本文中的耗费距离, 涉及时间成本和资费成本, 最优路径包括最小时间成本和最小资费成本路径两种。

2 耗费距离的最优路径分析原理

2.1 生成耗费权重栅格表面和源图层

耗费权重栅格表面中每个像元值记录了经过该像元时的耗费 (或称阻力)。从甲地到乙地的最优路径 (耗费最小的路线) 就是使得路径上所有像元耗费之和最小的路线, 因此, 基于耗费距离栅格的最优路径分析之关键是生成一幅代表不同地理单元的耗费权重的栅格表面。在不同的分析中权重的选取不同, 可以是土地利用数值, 也可以是地形地貌因子等^[8]。本文中权重选取像元的通行时间和通行资费。

源图层可以是选中的一组点、线、面, 或者是栅格图层中选中的点。

2.2 生成累积耗费距离表面和方向栅格

(1) 栅格点最小累积耗费距离的计算

栅格数据中的每个像元均与周围的 8 个像元相连通, 其最优路径可能是向这 8 个方向中的某个方向行进的一条路径生成累积耗费距离表面的过程, 是一个从源像元向邻近像元扩散的过程, 首先从源点开始计算其到周围各有效通行点的连通过用值, 根据方向不同计算公式不同^[9]。

垂直或水平方向相邻像元之间的耗费距离计算公式为:

收稿日期: 2006-07-04; 修回日期: 2007-01-09

作者简介: 康 苹 (1982-), 女, 中国科学院地理科学与资源研究所研究生, 主要研究方向: 城镇发展与高等级道路关系。E-mail: kangp@lreis.ac.cn

$$W_{ij} = (C_i + C_j) / 2 \tag{1}$$

斜方向即对角线方向相邻像元的耗费距离计算公式为：

$$W_{ij} = 1.414\,214\,(C_i + C_j) / 2 \tag{2}$$

其中， C_i 、 C_j 为像元 i 、像元 j 自身的耗费值， W_{ij} 表示像元 i 到像元 j 的耗费距离。

按照 Dijkstra^[10]算法思想，从连通过用计算结果中找出最小值点作为当前点，并计算该点到其各连通方向的累积耗费值，然后再选取到源点连通累积耗费最小点作为当前点继续向其周围扩散，直至得到栅格数据中所有点到源点的最小累加耗费距离为止^[11]。

(2) 方向栅格层的产生

方向栅格层中每个栅格值标识了每一个结果像元沿着最小累积耗费的路径到达相应的最小耗费源像元所经过的像元中，与其相邻的像元之间的方向。如图 1 所示，源像元本身是 0，源像元的 8 个方向分别用 1~8 表示^[12]。

6	7	8
5	0	1
4	3	2

图 1 方向指示图

Fig. 1 Direction map

计算过程如图 2~5 所示，输入源栅格和耗费表面栅格（空白处为 NODATA），输出计算结果累积耗费距离表面和方向栅格。

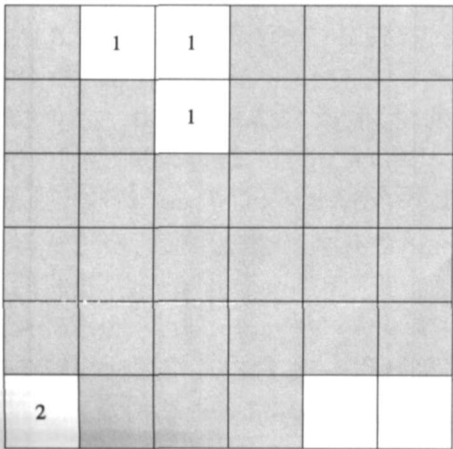


图 2 源栅格

Fig. 2 Source_Grid

1	3	4	4	3	2
7	3	2	6	4	6
5	8	7	5	6	6
1	4	5		5	1
4	7	5		2	6
1	2	2	1	3	4

图 3 耗费表面栅格

Fig. 3 Cost_Grid

2.0	0.0	0.0	4.0	7.5	10.0
6.0	2.5	0.0	4.0	9.0	13.9
8.0	7.1	4.5	5.0	10.5	12.7
5.0	7.5	10.5		10.6	9.2
2.5	5.7	6.5		7.1	11.1
0.0	1.5	3.5	5.0	7.0	10.5

图 4 累积耗费距离表面

Fig. 4 Costdistance_Grid

1	0	0	5	5	5
7	1	0	5	5	5
3	8	7	6	5	3
3	5	7		3	4
3	4	4		4	5
0	5	5	5	5	5

图 5 方向栅格

Fig. 5 Cost_Back_Link_Grid

2.3 求两地最优路径

在累积耗费距离表面的基础上，可以回溯任意栅格像元与源像元的最优路径。对于累积耗费

距离表面中的目的像元 i 在它的 8 个相邻像元中必可找到一个像元 j 满足公式 (3):

$$X_i - X_j = W_{ij} \quad (3)$$

其中, X_i 、 X_j 为像元 i 、 j 的最小累积耗费距离, W_{ij} 表示像元 i 到像元 j 的耗费距离。

则像元 j 必位于像元 i 与起始像元的最短路径上, 且位于像元 i 之前。如此反复计算直至像元 j 为起始像元, 即可反推出像元 i 和起始点之间的最短路径。由于在方向栅格中已经存储了识别路径上相邻像元的编码, 编码用于从给定像元到最近的源的导航。因此也可以直接借助上一步得到的方向栅格, 得到当前像元与源像元的方向, 从而反推最优路径。

得到累积耗费距离表面和最优路径后, 即可模拟两地之间的行车时间和行车资费。

3 珠江三角洲主要城市间最优路径模拟

3.1 研究区概况

珠江三角洲主要城市包括广州市、深圳市、珠海市、佛山市、江门市、东莞市、中山市、惠州市和肇庆市。这些城市经济发达, 城镇化水平高, 公路网建设明显领先于内陆地区, 城市间通行状况良好, 具有很高的研究价值。目前广东省全省高速公路通车里程突破 3 100 km, 位居全国第二, 其中大部分位于珠江三角洲。珠江三角洲 9 个城市之间均以高速公路相连, 已建成通车的高速公路包括: 广深高速、广珠高速、广佛高速、广肇高速、西部沿海高速、莞深高速、广州环城高速等。境内国道有: 107 国道、106 国道、105 国道、205 国道、324 国道、325 国道等。本文主要研究珠江三角洲以广州为中心, 高等级道路 (高速公路、国道和省道) 为基础的城市间的通行情况。

3.2 数据准备

由广东省公路数据, 配准广东省 1:25 万公路图, 修正高速公路、国道、省道三种不同级别的道路, 并对高速公路做 150m 的缓冲。叠加珠江三

角洲县界, 土地利用图层得到珠江三角洲公路、水域、高速公路缓冲区三个矢量层。将这三个层栅格化, 像元大小为 100 m \times 100 m, 得到的栅格层将依照下面的模型进行重新赋值运算。

3.3 建立耗费表面模型

本研究假设: 国道、省道在高速公路入口处都可以连接高速公路, 所有的道路交接处都可以通行, 不考虑逆行转向等因素。高速公路两边隔离带和水域上车不通行, 除此之外的非公路区域考虑到现实中低等级道路的存在, 可以认为在一定程度上通行。在此假设基础上, 建立模型如下:

(1) 时间成本表面模型

行车时间主要取决于行车速度, 对于行车速度本文不考虑车型与驾驶者习惯及地形 (本研究区道路基本在平地), 只考虑道路等级的作用。根据道路通行能力和时速限制, 高速公路、国道和省道的行车速度分别取 100 km/h、60 km/h 和 40 km/h。对于无高等级道路的区域, 并非绝对不能通行, 考虑到现实中低等级道路的通行能力, 所以取值 20 km/h。栅格图层中每个栅格大小为 100 m \times 100 m, 根据公式 $T = D/V$ (T : 行车时间; D : 行程; V : 行车速度), 即可求得车辆通过各栅格点的通行时间成本。在时间耗费表面模型图中, 栅格点的值代表车辆经过该栅格时所耗费的时间, 单位 (h)。

(2) 资费成本表面模型

通行成本主要是油耗和高速公路通行费。汽车百公里平均油耗由发动机排量、变速箱、驾驶习惯等因素决定。统计表明, 车辆百公里油耗呈现典型的枣核形分布, 77.3% 的样本百公里油耗在 5~10 L 之间, 本文取中间值 8 L。油价取 5 yuan/L, 则不论车型, 道路等级等因素, 油耗统一折算为资费 0.08 \times 5 = 0.4 yuan/km。按照当地的标准, 对本研究区的几条高速公路通行费进行折衷, 高速公路通行费取 0.5 yuan/km。根据栅格图层中栅格大小 (100 m \times 100 m), 即可求得车辆通过不同道路栅格的资费。在资费耗费表面模型图中, 栅格点的值代表车辆经过该栅格时所耗费的资费, 单位 (yuan)。

表 1 不同等级道路的车速、时间成本、资费成本表
Tab.1 Vehicle speed, time-cost and expenses-cost

栅格地物	车速 (km /h)	栅格时间成本 (h)	资费 (yuan/km)	栅格资费成本 (yuan)
高速公路	100	0.001	0.9	0.09
平地国道	60	0.00167	0.4	0.04
平地省道	40	0.0025	0.4	0.04
无路区域	20	0.005	0.4	0.04
江河	0			
高速公路隔离带	0			

3.4 生成累积距离，寻找最优路径

取广州为源点，生成最小累积距离，并计算最优路径。得到的结果见图版 彩图 1~3。

4 公路网路径分析

从广州出发，每个栅格点计算一个最小距离 (图版 彩图 1为最小时间距离，图版 彩图 2为最小资费距离)，并进一步计算了广州到珠江三角洲其他 8 个城市的相应得最小时间和最小资费路径。

(1) 如图版 彩图 1所示，珠江三角洲范围任意栅格点到广州所有最短时间值中的最大值为 4.78h；如图版 彩图 2所示，珠江三角洲任意栅格点到广州的所有最小资费值中最大值为 107.26yuan。在这两幅图中可以量测任意栅格点的最短时间和最小资费，计算结果与现实基本吻合，表明本研究采用的模型模拟准确度较高。

(2) 图版 彩图 3表明，当以时间最小为路径选择条件时，结果路径都沿高速公路行进。从广州出发到沿广深高速 1.49h 抵达深圳，沿广珠高速东线 1.38h 抵达珠海，到其他城市中山、东莞、佛山、江门、肇庆、惠州时间分别是 1.13h、0.79h、0.32h、1.20h、1.20h、1.63h (城市所选取的计算栅格点位置不同，计算结果会略有不同)，可见高速公路的存在极大的缩短了珠江三角洲城际间距离。

(3) 在图版 彩图 3中，珠江三角洲其他 8 城市到广州的最小资费路径与最小时间路径的分布正好相反，结果路径都选取非高速公路行进。显然，这种计算结果是由高速公路速度快 - 时间短 - 有偿行驶的特点决定的。现实中，驾驶者一般会 将时间和资费兼顾考虑，会在高速公路和非

高速公路之间选择行驶，所以行驶时间一般会大于本研究计算的最小时间，资费也会大于本研究计算的最小资费。当然，这种规律适用于有高速公路联通的城市，不适合对无高速公路联通的县、镇级的模拟计算。

5 结语

本文在阐明耗费距离的公路网络路径分析原理的基础上，以珠江三角洲公路网络为例，模拟了珠江三角洲区域的车辆通行时间和通行资费状况，同时计算了主要城市间的最小时间路径和最小资费路径，模拟结果具有较好的拟真性。可见，栅格路网模型可以对区域内的所有点进行模拟，非常适合于对面状数据的分析研究，具有广泛的应用前景。同时也存在一些问题，如城市是一个面域，仅仅选取一个点计算欠合理，此外，仅对高等级道路建模，模拟效果不够细致。

参考文献

[1] Den N, Pang C Y. Shortest-path algorithms: Taxonomy and annotation. Networks, 1984, 14: 275 ~ 323

[2] 刘瑜, 高勇, 张毅. 基于耗费场的最优路径算法研究. 地理与地理信息科学, 2004, 2 (1): 28 ~ 30

[3] 刘学锋, 孟令奎, 李少华 等. 基于栅格 GIS 的最优路径分析及其应用. 测绘通报, 2004, 6: 43 ~ 45

[4] 潘海啸, 栗亚娟. 都市区高速公路对近域城镇发展影响研究: 以上海市为例. 城市规划汇刊, 2000, (5): 44 ~ 50

[5] 杨忠臣, 陆玉麒. 高速公路建设与区域城镇分布的相互影响初探 ——以山东省为例. 中国人口. 资源与环境, 2003, 13 (3): 57 ~ 61.

[6] 耿虹, 赵学彬. 高速公路推动小城镇发展的作用探究. 小城镇规划, 2004, 2 (9): 43 ~ 48

- [7] 姚士谋, 管弛明, 房国坤. 高速公路建设与城镇发展的相互关系研究初探——以苏南地区高速路段为例. 经济地理, 2001, (5): 300~305.
- [8] 樊红. Arc/Info应用与开发技术. 武汉: 武汉测绘技术大学出版社. 1999.
- [9] 高伟, 张剑波. 基于栅格数据模型的最优路径算法及实现. 黑龙江工程学院学报 (自然科学版), 2004, 18 (1): 22~24.
- [10] Cherkassky B V, Goldberg A V, Radzik T. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation. Mathematical Programming, 1996, 71: 129~174.
- [11] 秦昆, 关泽群, 李德仁 等. 基于栅格数据的最佳路径分析方法研究. 国土资源遥感, 2002, 2: 38~41.

Studies of the Optimum Route Model of Road-network Based on Costdistance ——A Case Study in the Pearl River Delta

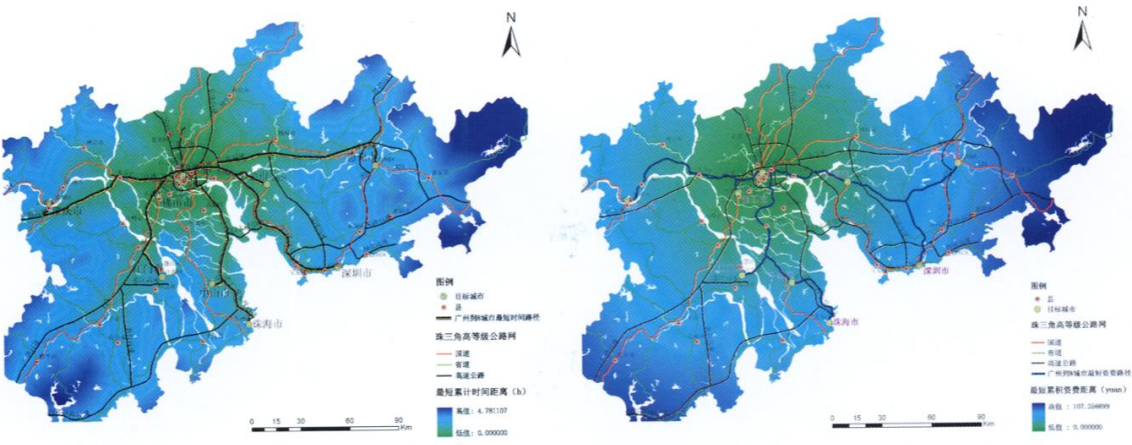
KANG Ping^{1,2}, LIU Gaohuan¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

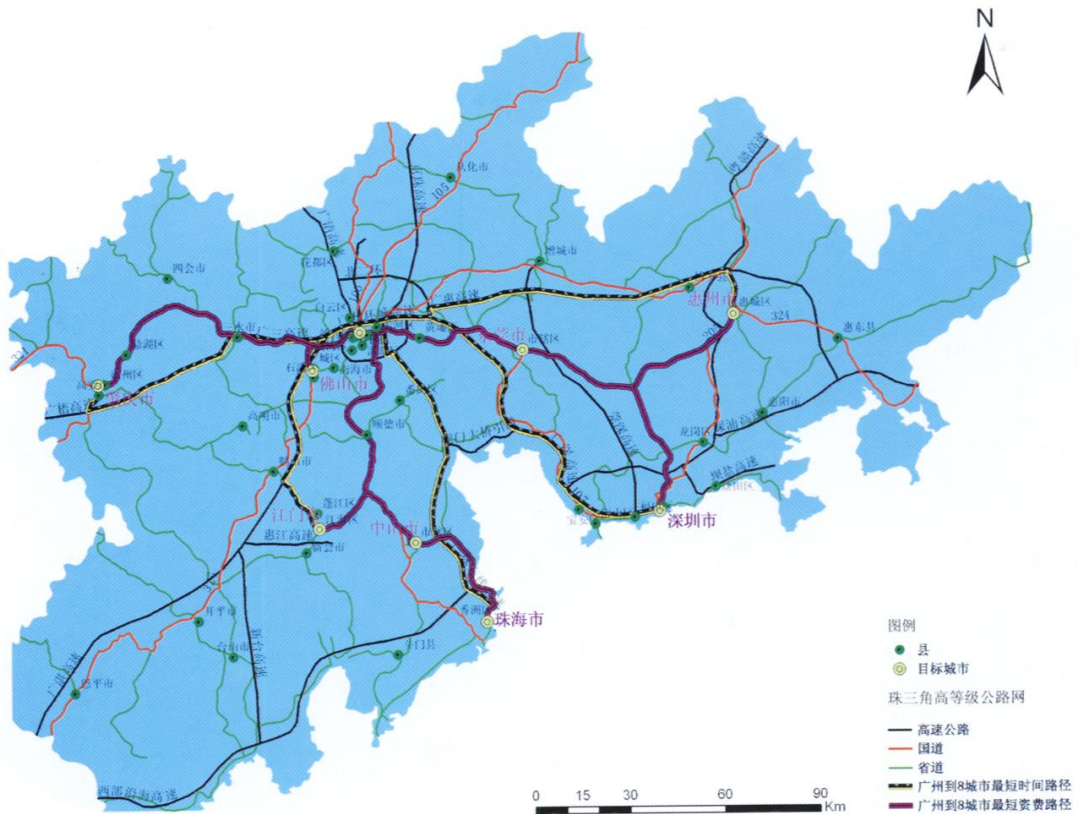
Abstract: The algorithm of optimum route analysis based on raster data model, which considers different influencing factors as driving time and expenses, confirms the optimum route through calculating the accumulative cost value minimally. Taking road-network in the Pearl River Delta as an example, this paper introduces the simulation technologies of road shape and driving speed, and the analysis of the shortest driving time and expenses. Finally the shortest driving paths between the major cities in the Pearl River Delta are calculated.

Key words: road-network; cost grid; direction grid; accumulative costdistance; optimum route analysis



彩图 1 珠江三角洲公路通行时间图
Fig.1 Driving time of the major cities in the Pearl River Delta

彩图 2 珠江三角洲公路通行费用图
Fig.2 Driving expenses of the major cities in the Pearl River Delta



彩图 3 最短时间路径和最小资费路径对比图
Fig.3 The shortest time path and the shortest expenses pat