

# 城市道路网络演变模型

杨超<sup>1</sup>, 王燚<sup>2</sup>, 曾鹏<sup>1</sup>

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 复旦大学 城市规划与发展研究中心, 上海 200433)

**摘要:** 为了探寻城市道路网络的内在演变规律, 基于叶脉生长模型, 提出了道路网络演变模型, 分析路网中节点的生成规律; 根据道路网络的特点, 提出生成节点与已有路网的连接规则. 以上海市浦东新区为研究对象, 研究节点新增比例与经济、人口等指标的关系, 提出了节点新增比例模型. 按照提出的演变模型, 模拟研究年的道路网络, 对比实际路网和模拟路网的一些复杂网络指标. 结果表明, 该模型能较好地模拟实际路网的变化.

**关键词:** 网络演变; 城市道路网络; 复杂网络; 节点生成  
**中图分类号:** U 491 **文献标识码:** A

## Evolution Model of Urban Road Network

YANG Chao<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, ZENG Peng<sup>1</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Reseach Center for Urban Planning and Development of Fudau University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In order to explore the evolution rule of urban road network, the paper presents a road network evolution model based on the vein growth model and an analysis of the generation mechanism of new nodes in the network. According to this mechanism, a connection rule among the generated nodes and existing road network was established. A case study was made of Pudong New District of Shanghai on the relationship among nodes generation proportion and indicators such as economy and populations, and a node generation proportion model was proposed. The proposed network evolution model was employed to simulate the evolution of road network in different years. Some complex network indicators were defined to compare the actual and simulated road network. The results demonstrate that the road network evolution model is able to simulate the evolution of the actual road network.

**Key words:** network evolution; urban road network; complex

network; node generation

目前, 在城市交通规划中, 需求是通过相应的分析模型量化和预测的, 而供给则更多地是依靠规划人员的经验提出满足未来交通需求的方案, 并通过交通需求, 分析评价规划方案是否达到规划目标. 而对比我国城市交通规划方案 and 实际实施的情况, 尚存在较大的差异, 规划路网方案未能完全实施导致供需矛盾凸显、交通拥堵频现. 为此, 是否应该对目前的城市交通规划方法重新审视? 如何认识未来可能实现的路网? 或者说未来的路网是否也可以像需求那样预测? 笔者试图通过对城市道路网络历史数据的分析, 寻找其随时间演变的规律及影响因素, 以期对上述问题的理论研究提供基础和借鉴.

城市道路网络的发展和变化, 直接影响着城市的形态, 是城市发展的重要基础. 近年来, 随着复杂网络研究的兴起, 城市交通网络(道路、轨道、公交等)特征研究方面的成果颇多<sup>[1-4]</sup>. 相对而言, 基于复杂网络理论对城市道路网络演变的研究并不多<sup>[5]</sup>.

笔者试图基于叶脉生长模型<sup>[6]</sup>提出符合道路网络特征的网络演变模型, 包括节点的生成、节点与已有路网的连接规则等; 其次, 为便于对比模拟路网与实际路网, 给出一些路网评价指标; 然后, 运用所提出的道路网络演变模型, 模拟实际道路网络, 计算实际路网和基于模型模拟路网的一些网络特征指标, 并对比分析; 最后给出研究结论.

## 1 城市道路网络演变过程

城市道路网络演变(简称路网演变)是指随着时

收稿日期: 2010-05-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(70631002); 上海市青年科技启明星计划(08QA14066); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0406)

第一作者: 杨超(1974—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: tongjiyc@tongji.edu.cn

通讯作者: 王燚(1981—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: evonne.w@126.com

间的推移,城市中道路网络节点和路段变化的过程.由于城市道路减少的情况较少,因此,只考虑节点或路段新增的情况.在分析路网演变过程前,先简单介绍 Runions 等提出的叶脉生长模型<sup>[6]</sup>.

Runions 等通过研究树叶叶脉生长过程,发现叶子的成长首先会生长出许多点状生长激素源,激素源分泌出生长激素.为了向下输送这些激素,从激素源会生长出新叶脉,与已成型叶脉网中的生长激素源连接,且这个连接有一定的原则,如图1所示.

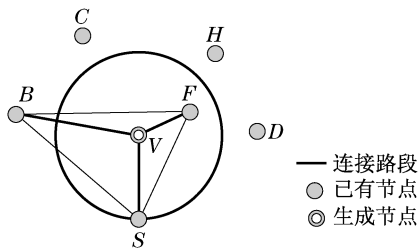


图1 叶脉连接规则

Fig.1 Connection rule of leaf venation

图中,  $V$  是新的生长激素源,  $F, B, C, D, H$  和  $S$  是已成型的增长激素源,假设  $V$  需要跟  $S$  连接,当且仅当两激素源之间没有叶脉阻隔,并且对于其他任意一个不同于  $S$  的已成型的增长激素源  $U$ ,都有下式成立,则认为  $V$  和  $S$  是可以连通的:

$$d(V, S) < \max(d(S, U), d(U, V)) \quad (1)$$

式中:  $d(V, S)$ ,  $d(S, U)$  和  $d(U, V)$  分别表示激素源  $V$  和  $S$ ,  $S$  和  $U$ ,  $U$  和  $V$  之间的距离.按照这种规则,  $V$  可以与  $F$  和  $B$  及  $S$  相连,不能与  $C$  和  $D$  及  $H$  相连.

可以看出,叶脉生长和路网生长有着一定的相似性. Barthelemy 和 Flammini<sup>[5]</sup> 基于叶脉生长模型<sup>[6]</sup>,提出了一个简单的城市道路网络演变模型.该模型以叶脉成长为启发,以局部连接距离最短为目标,研究了城市道路网络生成节点与已有路网节点之间的连接规则.但是,其节点生成模型过于简单,生成节点与已有路网中节点的连接规则也不能完全适用于城市道路网络,模拟演变出来的拓扑结构与道路网络的拓扑结构亦存在明显的差异. Barthelemy 和 Flammini<sup>[7]</sup> 又用密度和拓扑的双因子演变规律,对这种简单模型进行了影响分析,研究了人口密度和道路网络演变的相互影响.但是,这种分析更多地是建立在城市规划的角度,阐述的是这种模型对于城市形态的影响,未使用这种演变方法基于实际路网演变道路网络.

将城市道路网络抽象为图  $G = \{A, E\}$  ( $A$  为通

过路段  $E$  连接的节点集合),路网演变过程如下:对一个给定的道路网络,首先通过一定的规则生成新节点,然后将这些节点通过一定的连接规则,与已有路网中的路段或节点连接产生新的路段,从而形成新的道路网络.演变过程中新增节点包括生成节点和连接节点.生成节点指按一定规则生成于研究区域内的节点,其位置不在已有网络的路段上;连接节点指由生成节点与已有网络中的路段连接而在路段上形成的新节点.同样,新增路段也包括生成路段和连接路段.生成路段指生成节点与已有路网中节点连接所产生的路段;连接路段指生成节点与已有路网中的路段连接所产生的路段.如图2所示.

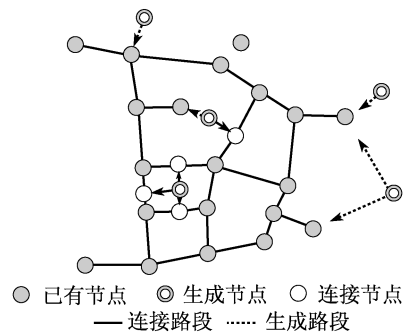


图2 道路网络演变示意图

Fig.2 The sketch map of road network evolution

## 2 城市道路网络演变模型

### 2.1 假设

为便于研究,做如下假设:

(1)只考虑经济增长、人口规模、路网密度以及网络本身的一些复杂网络特性对路网演变的影响,对于地理环境等因素,由于量化分析有一定的难度,暂不考虑.

(2)在一定范围内,相同的环境影响下,路网中生成节点相互之间没有影响,同时间段内出现的生成节点相互之间不连接.

(3)任何一个生成节点必须至少激发一条路段连接到已有路网中,不允许出现孤立节点以及围绕它单独演变成一个新的、与已有路网不连通的网路.

根据上节的分析,路网演变过程可以分为生成节点和生成路段两部分.在研究中,取单个节点或路段演变分析没有实际意义,而若将研究区域作为一个整体分析,又体现不出不同位置道路网络演变的不均衡性,因此,将整个研究区域划分为研究小区.

## 2.2 生成节点

首先通过统计分析,推算整个研究区域内节点增长率,可用如下公式计算:

$$P_N = (\alpha \rho_r + b) / Z \quad (2)$$

其中:  $P_N$  为基础年至目标年期间区域总节点数的年平均增长率;  $a, b$  为回归系数;  $\rho_r$  基础年的路网密度;  $N$  为基础年至目标年的年份数, 如以 2010 年为基础预测 2020, 则  $N = 10$ ;  $Z$  的定义如下:

$$Z = \begin{cases} 1, & N \leq 2 \\ 0.721^{\ln N}, & N > 2N \end{cases}$$

根据节点增长率和基础年路网节点数, 可以计算得到目标年路网节点总数和路网演变中新增节点总数(目标年节点数减基础年节点数)。同时, 定义小区节点新增比例为某个研究小区新增节点数与研究区域新增节点总数的比值。某个研究小区的节点新增比例实际上也近似反映了新增节点出现在该小区内的概率。在生成节点的过程中, 对于一个从“零”开始演变的路网, 使小区内节点数达到节点新增总数即可; 但是对于一个已有路网, 在经济发展和路网扩张快的小区内, 新增节点的比例要高; 而在已经发展成型的小区内, 由于道路用地的限制, 路网密度会达到一个上限, 这时新增节点的比例则要低得多。

根据假设(1)和(2), 对上海市浦东新区按照现行的行政区划进行分区(按用地性质划分小区, 对于资料收集有很大的困难), 统计各小区样本年的经济、路网和人口等资料, 并计算各小区节点新增比例。经统计, 小区  $i$  的节点增长比例( $P_i$ )分别与小区的目标年人口密度( $\rho_{pi}$ )和基础年的税收收入( $T_i$ )、路网密度( $\rho_{ri}$ )、路网聚集度<sup>[8]</sup>( $C_i$ ) (使用对偶法<sup>[9]</sup>计算)的相关性如表 1 所示。

表 1 节点新增比例与各特征因素的相关性  
Tab.1 Correlation of node generation proportion and characteristic factors

相关性	$\rho_{pi}$	$T_i$	$\rho_{ri}$	$C_i$
Pearson 系数	-0.551	0.59	-0.490	0.448
显著性水平/%	99	95	99	99

根据以上的相关性分析, 可以建立如下的小区节点新增比例基准值公式:

$$\hat{P}_i = \alpha \exp(\beta T_i - \omega \rho_{ri} + \theta / \rho_{pi} + \mu C_{bi}) \quad (3)$$

式中,  $\alpha, \beta, \omega, \theta, \mu$  为相应变量的系数。

模型采用税收作为经济指数, 是因为税收与基础设施投资有密切关系, 且税收较 GDP 更能反映公共投资能力的强弱。按照行政区划划分小区时, 涉及

到两种行政建制——街道和镇的区分。其中街道一般属于城市用地, 道路类型为城市道路; 而镇一般有农业用地, 道路包括公路。从基础设施发展速度来看, 镇较街道要快。为区分两种不同行政建制对路网变化速度的影响, 引入行政建制因子  $\lambda$ , 得到如下的小区节点新增比例模型:

$$P_i = \begin{cases} \hat{P}_i + \left[ \left( 1 - \sum_{i=1}^k \hat{P}_i \right) / k_1 \right], & \text{街道} \\ \hat{P}_i + (1 - \lambda) \left[ \left( 1 - \sum_{i=1}^k \hat{P}_i \right) / k_2 \right], & \text{镇} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为行政建制调整因子, 取值范围为  $0 \sim 0.5$ ;  $k_1$  为“街道”建制小区个数;  $k_2$  为“镇”建制小区个数;  $k$  为区域内研究小区总数,  $k = k_1 + k_2$ 。

得到各个小区的节点新增比例后, 再根据区域新增节点总数计算得到各个小区的新增节点数。

## 2.3 生成路段

一个节点生成于路网后, 将根据一定的连接规则与已有路网相连。为论述方便, 假设有生成节点  $I, J$  需连接到路网中, 选择距离最优为目标, 即最大限度地减少它们与已有路网连接的距离(暂不考虑道路等级, 这时距离最优和时间最优是一致的)。这意味着新建道路的成本最小, 则  $I$  和  $J$  都会选择已有路网中距离最近的节点<sup>[6]</sup>。设节点分别为  $M_1$  和  $M_2$ , 则

(1) 假设  $M_1 \neq M_2$ , 则直接连接  $M_1 I$  和  $M_2 J$ ;

(2) 假设  $M_1 = M_2$ , 这种情况下仍然直接连接  $M_1 I$  和  $M_2 J$  是不经济的, 最好的方案是保证已有路网( $M$ )到  $I$  和  $J$  的距离之和最小。采用渐进逼近的方式

$$\max \Delta = [d(M, I) + d(M, J)] - [d(M', I) + d(M', J)] \quad (5)$$

其中:  $M'$  是  $M$  每次向  $I$  和  $J$  逼近一个小步长后得到的新节点, 满足公式(6)和(7)的要求,  $d(M, I)$  为  $M$  和  $I$  的距离。

$$|MM'| = k \ll 1 \quad (6)$$

$$MM' \propto u_I + u_J \quad (7)$$

其中:  $u_I$  和  $u_J$  表示  $M$  至  $I, J$  的单位向量;  $k$  表示常数。

通过求解式(5), 最终能保证已有路网到  $I$  和  $J$  的距离之和最小, 收敛条件为式(6)和(7)。当  $u_I + u_J \approx 0$  时停止, 连接  $M'I$  和  $M'J$ 。这种渐进过程如图 3 所示。

按照此规则生长出来的路网呈树状结构, 因为每一个生成节点只激发已有路网中的一个节点并与之相连, 而实际路网中还应有一部分环路。为此, 允许

一个生成节点能够激发已有路网中的多个节点并与之相连,规则同第1节中叶脉连接规则。

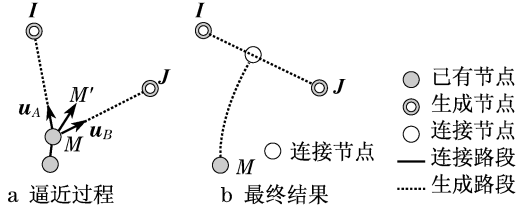


图3 已有路网中  $M$  向生成节点  $I, J$  渐进逼近示意图  
Fig.3 The sketch map of the node  $M$  approaching to nodes  $I$  and  $J$  in existing network

按照此规则,一个生成节点可能激发两个或两个以上已有路网中的节点.因此,生成节点和已有路网节点在连接过程中可能属于多对多的关系,当有多个生成节点激发了已有路网的同一个节点时,执行式(5)规则连接。

上述连接规则中,一个生成节点与已有路网连接时,都是与路网中已有的节点连接,可以保证在产生生成路段时不产生新的节点,使得生成节点数与新增节点一致,算法上也比较简单.但这样存在两个问题,首先,不能保证节点一定是最短的距离与路网连接.当生成节点能够以垂直或近似垂直距离连接路段时,可能比它与节点相连要近得多;其次,可能导致路网中已有节点连接的路段数大于4,这在实际路网中意味着路口是5路以上的交叉口,这样的交叉口是不常见的.因此,上述算法中的距离应该是广义距离,包括生成节点到已有节点的距离和到路段的最短距离,如图4所示。

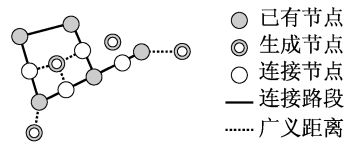


图4 使用广义距离的连接规则

Fig.4 Connection rule using generalized distance

## 2.4 算法流程

路网演变模型通过计算机实现的流程如图5所示.研究中采用 ArcGIS 的二次开发技术,运用其 VBA 开发环境实现编写算法代码,在 ArcGIS 环境下运行。

## 3 路网评价指标

为了对比本模型模拟实际路网演变情况的效果,选取以下的路网评价指标,分析模型的有效性。

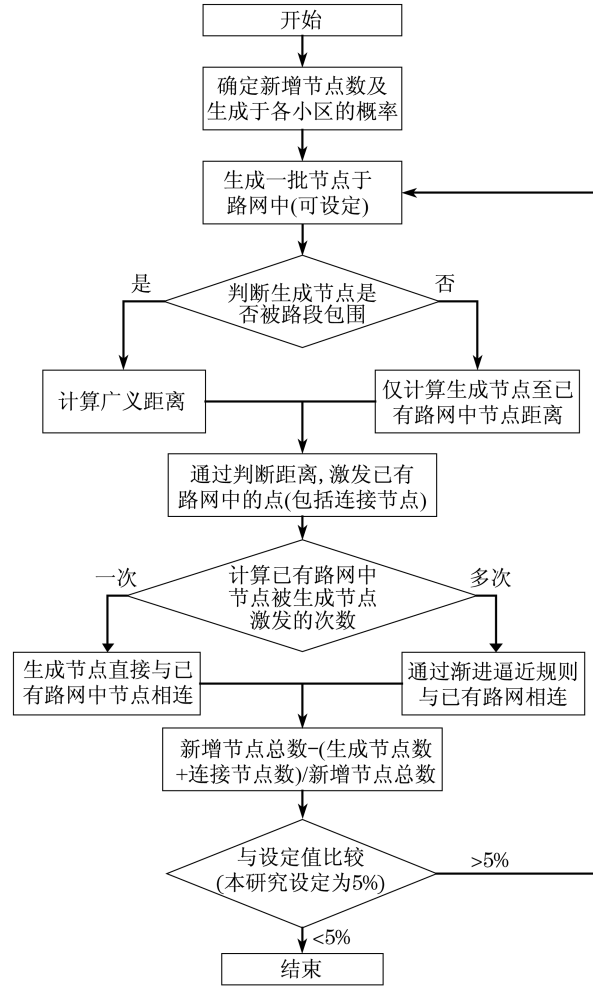


图5 算法实现流程图

Fig.5 Flow chart of the algorithm

(1)路网总长和路网密度 路网总长即路网中所有路段的长度,这里路段是无向的.路网密度即区域中路网长度与区域面积之比。

(2)平均最短距离<sup>[8]</sup> 该指标通过计算路网中某节点距其他节点的平均最短距离,从整体上反映网络的紧凑性和可达性,计算方法如下:

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (8)$$

其中: $L$  为平均最短距离; $n$  表示节点总数; $i, j$  为表示不同的节点; $d_{ij}$  为表示节点  $i$  至节点  $j$  的最短路径距离。

(3)网络中心势<sup>[8]</sup> 该指标包含三个内容:点中心势、介数中心势和邻近中心势.它们的一般计算方法和各自替换形式如式(9),(10),(11)和(12)所示。

$$C_X = \left( \sum_{i=1}^n [C_X(p^*) - C_X(p_i)] \right) / \left( \max \sum_{i=1}^n [\hat{C}_X(p^*) - \hat{C}_X(p_i)] \right) \quad (9)$$

其中:  $C_X(p_i)$  表示表示某个节点的中心势, 可能是点中心势、介数中心势或邻近中心势;  $C_X(p^*)$  表示在网络所有节点中, 中心势数值最大的一个节点的中心势;  $\max_{i=1}^n [\hat{C}_X(p^*) - \hat{C}_X(p_i)]$  表示由  $n$  个节点组成的图, 由于节点之间连接不同, 会产生各种形态, 该式表示在这些不同形态下, 节点中心势之间可能的最大差值。

点中心势的形式为

$$\hat{C}_D = \frac{\sum_{i=1}^n [C_D(p^*) - C_D(p_i)]}{n^2 - 3n + 2} \quad (10)$$

介数中心势的形式为

$$\hat{C}_B = \frac{\sum_{i=1}^n [C_B(p^*) - C_B(p_i)]}{n^3 - 4n^2 + 5n - 2} \quad (11)$$

邻近中心势的形式为

$$\hat{C}_C = \frac{\sum_{i=1}^n [C_C(p^*) - C_C(p_i)]}{(n^2 - 3n + 2) / (2n - 3)} \quad (12)$$

网络中心势可以反映网络的结构形态, 从整体上体现网络的拓扑性质。

## 4 算例

现以上海市浦东新区为研究对象, 调查该区从 1995 年至 2007 年的道路网络和社会经济发展等基本资料。由于浦东新区是上海改革开放试点区域, 1990 年前还是郊区, 建设用地比例很低。其后由于政策原因迅速发展, 包括路网的增长速度也较快, 到 2007 年, 除部分地区的路网达到了相对稳定的规模和密度, 大部分地区路网仍处于快速发展阶段, 对于研究路网演变提供了很好的条件。选取 1995 年、2000 年、2004 年以及 2007 年, 的数据(通过收集详细的地图, 将路网数字化后形成 ArcGIS 基础路网, 如图 6 所示), 通过对 1995—2000, 2000—2004 和 2004—2007 三个演变阶段标定模型参数, 运用模型模拟路网, 并与实际路网进行比较。

(1) 基本数据整理 将浦东新区根据行政区划分为 22 个研究小区, 其中 10 个为街道, 12 个为镇。由于花木街道在选取的研究年份一直是以镇为建制, 直到近年才改为街道建制, 因此研究中仍归为镇建制。在对数据分析后, 式(4)中  $\lambda$  的取值, 1995 年取为 0.05, 2000 年和 2004 年取为 0。

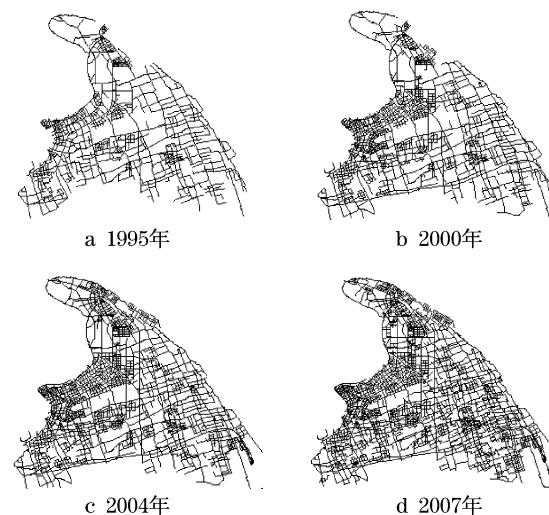


图 6 浦东新区各年 GIS 路网图

Fig. 6 Network of the Pudong New Area of different years in GIS

(2) 模型的标定 根据式(3), 利用 1995—2000, 2000—2004 和 2004—2007 三个阶段的路网演变数据, 对模型(3)进行回归分析, 得到参数估计值及 P 检验值(如表 2 所示)。P 检验值是计量经济结果对应的精确的显著性水平, 如表中  $\mu$  的 P 检验值小于 0.05, 说明其估计值在 0.05 水平上显著。

表 2 小区节点新增比例基准值公式参数标定结果

Tab. 2 The calibration result of the base value formula of district node generation proportion

项目	参数				
	$\alpha$	$\beta$	$\omega$	$\theta$	$\mu$
估计值	0.025 23	0.179 85	0.297 50	0.099 70	2.013 38
P 检验值	0.000 00	0.009 08	0.009 80	0.033 84	0.047 36

(3) 新增节点总数计算 根据以上基本数据准备, 计算出新增节点总数, 代入式(5)中计算, 并与实际结果对比, 如表 3 所示。

表 3 中, 预测总节点数与实际总节点数差异率均在 10% 以内(包含实际总节点数的统计误差 1%)。

表 3 不同年份节点总数预测对比

Tab. 3 Comparison of the forecasting total number of nodes in the different years

年份	实际总节点数	预测总节点数	差异率/%
2000 年	1 789	1 854	3.64
2004 年	2 537	2 735	7.82
2007 年	3 628	3 614	0.04

(4) 模拟路网 根据节点生成规则和连接规则通过计算和程序实现得到模拟路网. 三个演变阶段的模拟计算得到的路网如图 7 所示.

(5) 计算路网评价指标 计算得到的评价指标如表 4 所示.

表 4 评价指标计算结果  
Tab.4 Results of the evaluating indicators

评价指标	2000 年			2004 年			2007 年		
	实际	模型	相对误差%	实际	模型	相对误差%	实际	模型	相对误差/%
路网长度/km	1 270.00	1 240.00	2.70	1 630.00	1 560.00	4.40	2 020.00	1 890.00	6.30
路网密度/(km • km <sup>-2</sup> )	2.30	2.20	2.70	2.90	2.80	4.40	3.60	3.40	6.30
特征路径长度/km	23.70	22.00	7.17	27.80	25.90	6.80	30.90	30.80	0.30
点中心势/%	0.12	0.13	8.33	0.11	0.09	18.20	0.08	0.09	12.50
邻近中心势/%	1.86	2.75	47.80	1.30	0.81	37.70	1.40	1.16	17.10
介数中心势/%	22.50	18.70	17.00	28.60	25.20	11.20	23.60	22.00	6.70

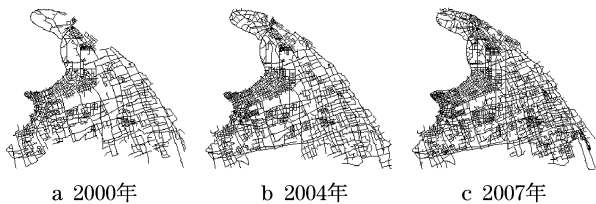


图 7 浦东新区各年模拟路网图

Fig.7 Simulated network of Pudong New Area of different years

由表 4 的可以看出,实际路网和模拟得到的路网,路网总长、路网密度、平均最短距离、点中心势和介数中心势五个指标的计算结果差异率在 20% 以内,而临近中心势的差异率在 2000 年和 2004 年比较高,但是一定程度上更反映出路网的拓扑形态.较大的计算结果,表明模拟路网更趋向于树状结构. 1995 年至 2000 年发展过程中,由于路网规模很不完善,通过模型模拟的路网会比实际的路网更趋于向树状结构发展,以增加可达性;然后,路网会向有更多环状结构的形式演变,以增加路网密度.这种演变模式更符合实际路网演变的需求.

5 结语

文章所提出的城市道路网演变模型,优化了生成节点与已有路网的连接规则,使得连接规则更加合理.通过研究上海市浦东新区的路网变化,建立了节点新增比例的回归模型.基于复杂网络理论提出了路网评价指标,对比分析模型模拟路网和实际路网,结果表明,道路网络演变模型能较好地模拟路网的实际演变过程.

本研究还存在一些不足,所提出的节点新增模

型中未考虑政策的影响.事实上,政策因素对路网演变起着非常重要的作用,当政策作用主导区域交通基础设施建设时,甚至可能使得路网自然演变的相应影响因子失灵.另外,本文给出的在某个小区内节点的生长,位置都是随机的.这是否符合实际情况,有待进一步研究.

参考文献:

[1] 刘妙龙,黄佩蓓.上海大都市交通网络分形的时空特征演变研究[J].地理科学,2004,24(2):144.  
LIU Miaolong, HUANG Peibei. Spatial-temporal evolution of fractal feature in traffic network of Shanghai metropolis[J]. Scientia Geographica Sinica,2004,24(2):144.

[2] Levinson D, Xie F, Oca N M. Forecasting and evaluating network growth[J]. Networks and Spatial Economics,2006,9(3):1007.

[3] Yang C, Wang Y. Characteristic analysis of urban rail transit network considering demand and operation; a case on Shanghai [C]//Proceedings of the 9th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation System Planning, Development, and Management, Haerbin; [s. n. ]. 2009:3406 – 3412.

[4] Chen Y Z, Li N. Statistical properties of urban ground bus-transport networks from self-avoiding random walks[J]. Modern Physics Letters B,2007,21(16):1027.

[5] Marc Barthelemy, Alessandro Flammini. Modeling urban street patterns[J]. Phys Rev Lett,2008,100(13):350.

[6] Adam Runions, Martin Fuhrer, Brendan Lane, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns[J]. ACM Transactions on Graphics,2009,24(3):702.

[7] Marc Barthelemy, Alessandro Flammini. Co-evolution of density and topology in a simple model of city formation[J]. Networks and Spatial Economics,2008,9(3):401.

[8] Newman M. The structure and function of complex networks [J]. SIAM Review,2003,45(2):167.

[9] Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets; a dual approach[J]. Physica A,2006,369(2):853.