

# 一种基于道路网络层次拓扑结构的 分层路径规划算法

李清泉<sup>1,2)</sup> 郑年波<sup>2)</sup> 徐敬海<sup>2)</sup> 宋莺<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430079) <sup>2)</sup>(武汉大学交通研究中心,武汉 430079)

**摘要** 鉴于平面最短路径算法应用于大规模网络规划中的效率不高,而分层算法引入“分而治之”策略,则能有效解决此难题。为了利用分层算法进行路径规划,首先研究了分层算法的数据基础——道路网络层次拓扑结构,其涉及基于道路等级的路网分层抽象、道路数据分区组织、以区域为单位的路网层次拓扑关系模型;接着提出了一种适用于LBS(基于位置的服务)的分层路径规划算法。该算法先通过距离值判断是否切换到上一层;然后利用启发式A\*算法搜索入口和出口;最后使用双向策略搜索层内两点之间的最短路径。利用现实道路网络进行的实验分析结果表明,该算法能从本质上提高大规模网络中路径规划的效率。

**关键词** 基于位置的服务 路径规划 最短路径算法 层次拓扑结构 分层算法

中图分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)07-1280-06

## A Hierarchical Route Planning Algorithm Based on Multi-level Topological Structure of Road Network

LI Qing-quan<sup>1,2)</sup>, ZHENG Nian-bo<sup>2)</sup>, XU Jing-hai<sup>2)</sup>, SONG Ying<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079)

<sup>2)</sup>(Transportation Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079)

**Abstract** The efficiencies of planar shortest path algorithms deteriorate sharply with the expansion of the network size. However, this puzzle can be well resolved by hierarchical route planning algorithms which use “decompose and conquer” strategy to reduce search space essentially. Firstly, the paper studies the underlying data background of hierarchical algorithms, namely, the multi-level topological structure of road network, which covers road-class-specific level abstraction method region partition of road map data and intra-region hierarchical topological relationship model. Secondly, a hierarchical route planning algorithm is proposed for the optimal route calculation in location-based services (LBS). In detail, line distances between start nodes and goal nodes are applied to judge whether the node need to be switched to higher level. A modified heuristic A\* algorithm is devised to search for the entrances to a higher level or the exits to a lower level. And a bidirectional strategy is adopted for intra-level optimal path computation. At last, some experiments using real road networks show that the proposed algorithm can largely improve the efficiency of route planning, especially for those cases with large-scale road network.

**Keywords** location-based services, route planning, shortest path algorithms, multi-level topological structure, hierarchical algorithms

## 1 引言

基于位置的服务(location-based services, LBS)

集成应用空间信息技术和移动通信技术可为出行者提供路径导引服务<sup>[1]</sup>。路径规划模块是实现此服务的核心组件,其效率直接影响到服务的质量。而路径规划问题实质上就是最短路径问题,解决此

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571134,40401051)

收稿日期:2006-03-27;改回日期:2006-06-16

第一作者简介:李清泉(1965~),男。武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室教授,1998年获武汉大学测绘科技大学摄影测量与遥感专业博士学位。主要从事GIS-T、ITS、空间信息服务、激光扫描测量、智能传感器网络等研究。E-mail: qqli@whu.edu.cn

问题的算法可以分为平面算法和分层算法两大类。

平面算法可以分为标号设定(label setting, LS)算法和标号改正(label correcting, LC)算法两大体系,其区别在于对节点处理策略的不同<sup>[2]</sup>。LS范畴的Dijkstra系列算法是求解大规模稀疏网络中一对一的最短路径问题的最佳选择<sup>[3]</sup>,其可以从存储结构和排序算法上对Dijkstra算法加以改进<sup>[4-6]</sup>;也可以引入启发式函数,构建A\*算法<sup>[7]</sup>;还可以采用双向搜索策略<sup>[8]</sup>;甚至可以集成使用双向策略和启发式策略<sup>[9]</sup>。通常改进算法的时间复杂度与节点数量正相关,如对数关系 $O(m \log n)$ 或 $O(m + n \log n)$ <sup>[2]</sup>,其效率会随着节点数量的增加、网络规模的扩大而急剧下降。

分层算法充分利用了人类对道路网络和路径搜索过程的认知<sup>[10]</sup>,引入了“分而治之”的策略,通过缩减搜索空间来提高算法效率,其基本思想是:先将道路网络抽象成不同细节程度的层,然后选择合适的数据层来进行路径搜索。分层算法涉及到网络的层次结构、基于层次的空间推理法则以及算法的效率与精度评估<sup>[11]</sup>等,其中,空间推理的难点在于如何确定层切换的条件和方法。文献[12]延续文献[11]的研究,将层次空间推理引入到行车最优路径搜索中,但这两篇文献都没有给出具体的路网层次拓扑结构表达方法,另外,如何搜索入口/出口也需要做进一步探讨。有一些方法可以实现层的切换,如“虚拟路段”法<sup>[13]</sup>、“邻近访问节点”法<sup>[14]</sup>,但是它们需要在搜索前就知道起点/终点附近的入口/出口信息。另外,层次编码视图方法<sup>[15]</sup>也是一种分层路径搜索方法,它可通过预计算、预存储最短路径,将路径搜索过程转换为一个表的查询过程,从而保证了路径搜索的效率和精度,但是其缺点也很明显,即需要占用大量的存储空间,且不能用于实时计算。

本文延续文献[11]和文献[12]的研究工作,从道路网络层次拓扑结构的讨论出发,试图设计一种实用的分层路径规划算法,并重点探讨层与层之间的推理法则,即层切换的标准以及搜索出口/入口的方法。

## 2 道路网络层次拓扑结构

下面从分层抽象、分区组织以及层次拓扑关系

表达3个层次来讨论道路网络层次的拓扑结构。

### 2.1 分层抽象

按照功能等级,将道路分为以下3类:① $R_0$ :一般道路(包括街道);② $R_1$ :城市主干道;③ $R_2$ :高等级道路(城市快速路、高速公路、国道等)。相应地,将道路网络抽象为由低到高的3层结构,即① $H_0 = R_0 \cup R_1 \cup R_2$ ;② $H_1 = R_1 \cup R_2$ ;③ $H_2 = R_2$ ,其中,上层是下层的子集( $H_2 \subset H_1 \subset H_0$ ),底层为现实道路网络,最为详细,顶层最为粗略(见图1)。

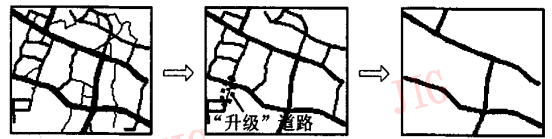


图1 道路网络的3层抽象

Fig.1 Three-level abstraction of road network

层次模型要求层独立,即每一层具有同样类型的对象、关系和操作,其差别仅仅在于对问题描述的详细程度的不同<sup>[9]</sup>。因此,在3层路网结构中,必须保证上面两层道路网拓扑连通,才可以将通过将低等级的道路“升级”到高层来实现(见图1)。

### 2.2 分区组织

先将道路网络按区域进行分割,再结合抽象出的不同道路层来构建总体的路网分层/分区框架。在此框架中,下层的几个区域(子区域)合成为上层的一个区域(父区域),父、子区域之间的对应关系可使用树结构表示(如图2所示)。

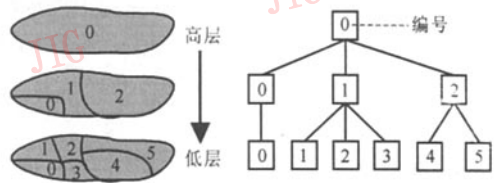


图2 道路数据的分层/分区框架

Fig.2 Level/region frame of road map data

按照“地图-层-区域”的层次结构来分级管理道路拓扑数据(见图3),其中,区域为数据管理的最小容器。这样就可以以区域为单位来检索和加载数据,不仅有利于提高数据加载速度,也可减小数据加载量。区域中包含的拓扑数据元素有:节点、路段、转向、路段花费等,它们的结构和意义将会在层次拓扑关系模型中详细讨论。

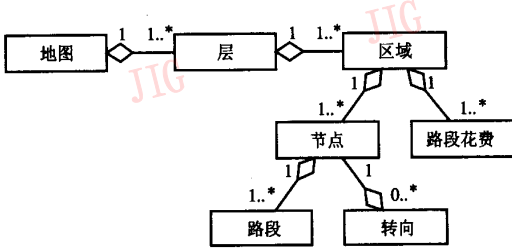


图 3 UML 类图表示的道路拓扑数据分级管理

Fig. 3 UML-class-diagram-figured hierarchical organization of road topology data

### 2.3 层次拓扑关系模型

拓扑数据以区域为单位进行组织,即每个区域内的拓扑关系表达方法相同,其模型如图 4 所示。

节点为拓扑检索的决策点,其“上层对应节点 ID”描述了节点的上下层对应关系,如果此字段不为 0xffff,则表明当前节点就是一个入口或出口;否则,当前节点不存在上层对应节点。如果当前节点的某个邻接节点在另外一个区域中,则称当前节点为边界节点,可通过字段“是否边界节点”来标识。

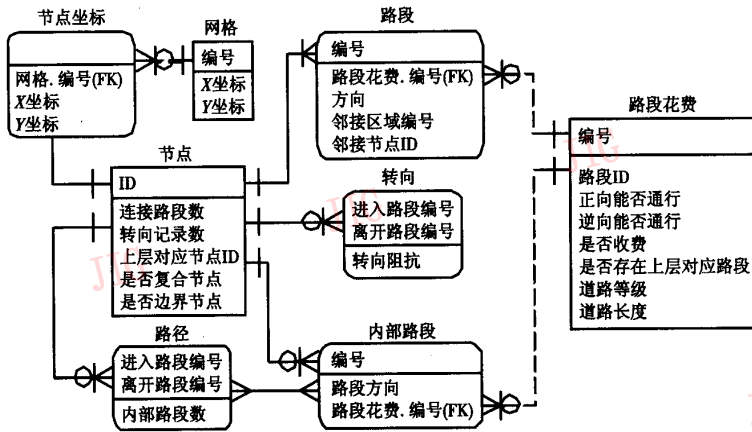


图 4 道路网络层次拓扑关系模型

Fig. 4 Hierarchical topological relationship model of road network

通常一条路段只属于一个节点,而现实的一条路段在模型中被存储两次,其区别仅仅在于数字化的“方向”不同。路段“编号”为从 0 到  $n-1$  的序号( $n$  为当前节点连接的路段的数量)。“邻接区域编号”和“邻接节点 ID”用于实现区域的无缝拼接,以保证拓扑检索过程得以延续。节点处的通行关系可通过转向表来表达,其中,如果“转向阻抗”为  $-1$ ,则表示禁止转向。

由于路段分方向存储,因此为了节省存储空间,可将路段属性独立出来,用于构建路段花费表。节点坐标采用规格化坐标来表示,即表现为节点坐标表和网格表。复合节点由多个内部节点和多条内部路段组成,其内部路径信息记录在路径表和内部路段表中。

### 3 分层路径规划算法

基于上面讨论的道路网络层次拓扑结构,假定起点  $S$  所在的层为  $L_i (0 \leq i \leq 2)$ , 终点  $D$  所在的层为  $L_j (0 \leq j \leq 2)$ , 设计分层路径规划算法流程如下:

(1) 如果起点  $S$  所在层次较低,即  $i < j$ ,则在层  $L_i$  正向搜索入口  $\hat{S}$ , 如果搜索失败,则退出循环;否则:①使用入口更新起点,即  $S = \hat{S}, i = i + 1$ ;②转向步骤(1)。否则:

(2) 如果终点  $D$  所在的层次较低,即  $j < i$ ,在层  $L_j$  逆向搜索出口  $\hat{D}$ , 如果搜索失败,则退出循环;否则,①使用出口更新终点,即  $D = \hat{D}, j = j + 1$ ;②转向步骤(1)。否则:

(3) 如果起点  $S$  和终点  $D$  不在顶层,即  $i = j < 2$ ,且二者相距“较远”,则在当前层双向搜索入口  $\hat{S}$  和出口  $\hat{D}$ ,①如果搜索失败,则退出循环;②如果双向搜索汇合,即直接找到最短路径,则转向步骤(5);③如果搜索到入口和出口,则 1) 使用入口更新起点,使用出口更新终点,即  $S = \hat{S}, i = i + 1, D = \hat{D}, j = j + 1$ ;2) 转向步骤(1)。否则:

(4) 在当前层双向搜索最短路径,如果搜索成功,则:

(5) 拼接各段局部路径得到完整的路径。

从上面的流程中可以看出,本算法需要重点解

决以下两个问题:一是“较近”和“较远”的定义,即层切换的标准;二是如何搜索入口/出口。

可以将“起点和终点是否在同一区域中”作为层切换的标准<sup>[11,12]</sup>,但此方法需依赖于数据生产时的区域分割规则,因区域范围过大或过小都会导致规划结果的不合理,而且,当两个点在相邻区域时,还是需要判读“两点之间的距离是否在一个区域范围内”<sup>[11]</sup>。鉴于此,本文算法采用“动态”区域判断法,即通过两点间的直线距离来判断它们是否在同一“虚拟”的区域中。设  $C_i$  为依附于第  $i$  层的距离标准, $d_i$  为第  $i$  层起点  $S$  和终点  $D$  之间的直线距离,如果  $d_i \leq C_i$ ,则两点“较近”;如果  $d_i > C_i$ ,则两点“较远”。 $C_i$  的值需要根据实际应用来确定。需要注意的是:如果  $C_i$  太小,则在双向搜索入口/出口时(步骤 3),就有可能直接找到当前层的最短路径;而如果  $C_i$  太大,则本算法就退化成了平面算法。在本文中,设定: $C_0 = 8\text{km}$ ;  $C_1 = 20\text{km}$ ;  $C_2 = 50\text{km}$ 。

入口/出口的搜索基本采用文献[9]提出的改进启发式 A\* 算法,只是需要将搜索成功的条件改为:“当前节点存在上层对应节点,并且当前路段存在上层对应路段”。如果采用传统的 Dijkstra 算法来搜索入口/出口,则通常会得到不合理的规划结果,其原因在于:搜索时没有考虑终点/起点的位置。在图 5 中,从起点  $S$  出发,正向搜索入口,如果使用 Dijkstra 算法,节点 1、2、3、4 具有同等的机会成为入口,但是由于节点 3 更靠近终点  $D$ ,故将其作为入口较为合理。A\* 算法通过启发函数  $h(n)$  迫使搜索沿着起点到终点的方向前进,这样沿此方向的节点将更有机会成为入口(如节点 3 所示)。

同一平面内最短路径的搜索(步骤 4)可采用双向启发式 A\* 算法<sup>[9]</sup>。在搜索过程中,它通过对“搜索节点(搜索节点等于路段加沿路段到达的节点)”进行标号来解决转向限制和延误问题(关于搜索节点以及基于搜索节点的标号算法见文献[9])。同时,此方法也能间接解决文献[12]指出的不可靠解

问题。路径规划完成后,由于得到的是一系列不同层的局部路径(见图 6),因此需要按照路径方向将它们拼接成一条完整的路径。

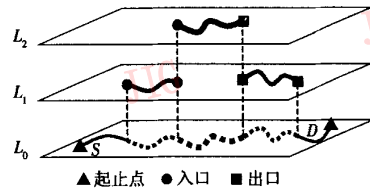


图 6 规划路径层次结构

Fig. 6 Hierarchical representation of a planned route

### 4 实验及算法分析

文献[11]利用规则正方形格网测试分层算法,可得到这样一个结论,即相比于平面算法,分层算法的时间复杂度从  $O(m^4)$  下降到  $O(\log_k m)$ 。其中, $k$  为常量(与道路数据分层标准相关), $m$  为规划路径的长度。由此可以看出,随着路径越来越长,运行时间减少得就越来越多。下面利用实际的道路网络对本文提出的算法进行验证分析。实验数据选用全国道路网,其中包含 200 多个城市,数据量为 2GB;实验环境为 CPU:P4 3.0GHz,内存:512MB;用于比较的平面算法选用双向启发式 A\* 算法<sup>[9]</sup>。

实验时,在底层  $L_0$  选取 10 对起止点(见表 1,图 7),其直线距离依次增加,相应的网络规模也越来越大。这 10 对起止点中,1~5 为北京市内搜索,6~10 分别为北京到天津、济南、上海、广州和厦门。对每一对起止点分别使用平面算法和分层算法进行搜索,搜索结果如表 1 和图 7 所示(PA 代表平面算法,HA 代表分层算法)。

表 1 两种算法的计算结果

Tab. 1 Computational results of two algorithms

路径	运行时间(s)		数据量(MB)		路径长度(km)	
	PA	HA	PA	HA	PA	HA
1	0.066	0.066	0.498	0.498	8.0	8.0
2	0.325	0.113	0.793	0.631	10.9	12.9
3	0.616	0.082	0.907	0.677	23.5	25.8
4	0.764	0.133	1.331	0.602	24.7	29.3
5	1.039	0.068	1.697	0.571	30.5	35.7
6	6.043	0.221	4.165	1.027	122.0	142.4
7	11.651	0.609	7.722	1.371	424.3	570.3
8	24.751	1.198	19.289	1.891	1242.7	1441.0
9	36.475	2.331	30.043	2.740	2228.6	2262.4
10	48.466	2.525	35.255	2.978	2195.2	2392.4

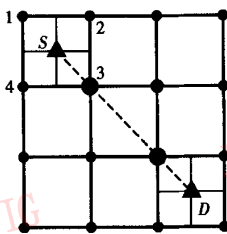


图 5 入口搜索示例

Fig. 5 An example for entrance searching

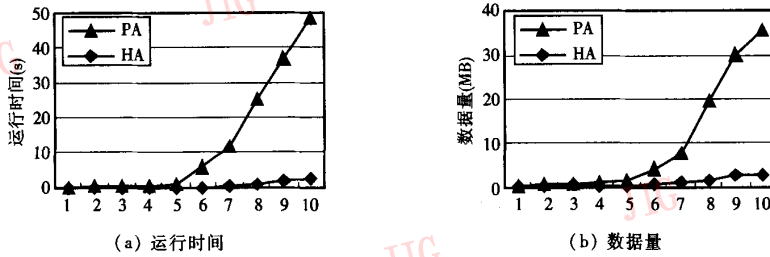


图 7 两种算法运行时间、数据量比较  
Fig. 7 Comparisons between PA and HA in run time, data size

由图 7 可以看出以下特点:①随着网络规模的扩大,平面算法效率急剧下降,特别是在跨城市长距离路径搜索时(路径 6~10),运行时间超过了 5s,虽然分层算法效率也会随网络规模的变大而下降,但是趋势相对不是很明显,而对于路径 6~10,运行时间也没有超过 3s,这表明分层算法的效率要比平面算法的高,在大范围路径搜索时,优势更为明显;②随着网络规模的扩大,平面算法加载的数据越来越多,甚至有可能超过 30MB(路径 9~10),这与嵌入式终端有限的内存资源相矛盾,虽然分层算法所需数据量也会随网络规模的扩大而增加,但趋势相对不是很明显,而对于路径 9~10,则不超过 3MB,这表明相比于平面算法,分层算法加载的数据更少,在大范围路径搜索时,能大幅度减少数据加载时间、节省内存资源;③如果起止点相距太近,则分层搜索时不会切换到上一层,这样分层算法就退化为平面算法(路径 1)。

从表 1 中可以看出,分层算法获得的路径要比平面算法的长,这表明分层算法不能保证获得数学意义上的距离最短路径。事实上,对多数出行者来说,距离最短路径没有多大的实用价值,因为这样的路径通常会引导他们穿行于偏僻的、难于通行的小道之间(图 8),而分层算法规划出的高速优先路径则更能满足出行者的行车心理(图 9)。



图 8 平面算法规划路径  
Fig. 8 The resulting route from PA

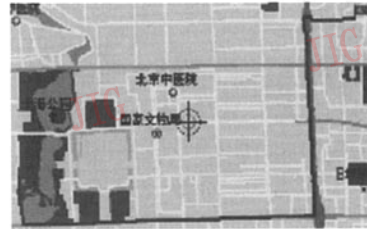


图 9 分层算法规划路径  
Fig. 9 The resulting route HA

### 5 结论

平面最短路径算法是求解 LBS 中路径规划问题的传统选择,但是其效率会随着网络规模的扩大而急剧下降。而分层算法则利用“分而治之”的策略,先通过对道路网络进行分层抽象,再选择合适的数据层进行搜索,由于其能从本质上大幅度缩减网络规模,从而解决了大规模网络路径规划效率低的问题。

本文主要研究基于道路网络层次拓扑结构的分层路径规划算法。为了支持分层搜索,可按照道路等级将路网抽象成 3 层,上层是下层的子集;为了管理道路拓扑数据,先将道路地图进行区域分割,再按照“地图-层-区域”的层次结构来分级组织;为了实现上下层拓扑关系的无缝连接,可在节点表中定义“上层对应节点 ID”字段。对于分层路径规划算法,重点探讨了以下两个问题:一是层切换的标准;二是搜索入口/出口的方法,即先通过“动态”区域法来判断是否需要切换到上一层;然后利用文献[9]提出的改进的启发式 A\*算法来搜索入口/出口。

通过在现实道路网络上的实验表明,本文提出的算法不仅效率高,且节省内存,适合于求解 LBS 中大范围路径规划问题。不过还需要利用具有不同

分布特征的道路网络来对  $C_i$  进行进一步测试,以期达到算法效率和精度之间更好的平衡。另外,本文的实验主要是测试算法的效率,还有必要以通行时间  $T(T=L/V_{\max}, L$  为路段长度,  $V_{\max}$  为路段最大允许通行速度) 为标准来系统地测试分析算法的合理性。

### 参考文献 (References)

- 1 LI De-ren, LI Qing-quan, XIE Zhi-ying, *et al.* The technique integration of spatial information and mobile communication [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(1): 1~8. [李德仁, 李清泉, 谢志颖等. 论空间信息与移动通信的集成应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(1): 1~8.]
- 2 LU Feng. Shortest path algorithms: Taxonomy and advance in research [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(3): 269~275. [陆锋. 最短路径算法: 分类体系与研究进展[J]. 测绘学报, 2001, 30(3): 269~275.]
- 3 Zhan F B, Noon C E. Shortest path algorithms: An evaluation using real road networks[J]. *Transportation*, 1998, 32(1): 65~73.
- 4 LU Feng, LU Dong-mei, CUI Wei-hong. Improved Dijkstra algorithm based on quad-heap priority queue and inverse adjacent list [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4A(12): 1044~1050. [陆锋, 卢冬梅, 崔伟宏. 基于四叉堆优先级队列及逆邻接表的改进型 Dijkstra 算法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4A(12): 1044~1050.]
- 5 Yue Yang, Gong Jian-ya. An efficient implementation of shortest path algorithm based on Dijkstra algorithm [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1999, 24(3): 209~212. [乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 209~212.]
- 6 Wang Jie-chen, Mao Hai-cheng, Yang De-zhi. United structure of point-arc for network graph and its application in GISs shortest path searching [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(1): 47~51. [王杰臣, 毛海城, 杨得志. 图的节点-弧段联合结构表示法及其在 GIS 最优路径选取中的应用[J]. 测绘学报, 2000, 29(1): 47~51.]
- 7 Goldberg A V, Harrelson C. Computing the Shortest Path: A\* Search Meets Graph Theory [R]. MSR-TR-2004-24, Microsoft Research, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA, 2003.
- 8 Kaindl H, Kainz G. Bidirectional heuristic search reconsidered [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1997, 7: 283~317.
- 9 Zheng Nian-bo, LI Qing-quan, XU Jing-hai, *et al.* A bidirectional heuristic shortest path algorithm with turn prohibitions and delays [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 256~259. [郑年波, 李清泉, 徐静海等. 基于转向限制和延误的双向启发式最短路径算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(3): 256~259.]
- 10 LIU B. Route finding by using knowledge about the road networks [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1997, 27(4): 436~448.
- 11 CAR A, FRANK A U. General Principles of Hierarchical Spatial Reasoning-The Case of Wayfinding [A]. In: *Proceedings of the Conference on Spatial Data Handling (SDH 94) [C]*, Edinburgh, Scotland, UK, 1994, 2: 646~664.
- 12 LU Feng, ZHOU Chen-hu, WAN Qing. An optimum vehicular path algorithm for traffic network based on hierarchical spatial reasoning [J]. *Journal of Whuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(3): 226~232. [陆锋, 周成虎, 万庆. 基于层次空间推理的交通网络行车最优路径算法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3): 226~232.]
- 13 Jagadeesh G R, Srikanthan T, Quek K H. Heuristic techniques for accelerating hierarchical routing on road networks [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2002, 3(4): 301~309.
- 14 Cao W, Wang S, Jiang Q, *et al.* A practical implementation of route finding [A]. In: *The 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology [C]*, Kuming, China, March 29-31, 2004.
- 15 Jing N, Huang Y W, Rundensteiner E A. Hierarchical encoded path views for path query processing: An optimal model and its performance evaluation [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1998, 10(3): 409~431.