

doi: 10.7690/bgzdh.2015.03.011

基于拓扑分层的路网简化模型及其应用

曹剑东¹, 张敖木翰¹, 李 兵²

(1. 交通运输部科学研究院信息中心, 北京 100029; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对分层最短路径算法的要求, 提出以普通单层路网为基础构建分层分区路网的方法。介绍分层分区路网模型和基于分层路网的最短路径算法, 给出实现分层路网中最短路径算法所需分层路网模型应具有的特点, 以北京市的单层路网模型为基础, 实现一个双层路网模型实例, 并应用于军队物资调配问题求解中。计算结果表明: 该模型可满足分层最短路径算法的要求, 提高最短距离的计算效率。

关键词: 分层; 路网模型; 最短路径; VRP

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

Simplified Model of Route Network Based on Hierarchical Topology and Its Application

Cao Jiandong¹, Zhang Aomuhan¹, Li Bing²

(1. Information Center, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China;
2. State Key Laboratory of Automotive Safety & Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The method to construct layered and divisional route network from ordinary monolayer route network is put forwards, which meet the requirements of the layered shortest path algorithm. The layered and divisional route network method and the shortest path algorithm based on layered route network are demonstrated. The characters of layered route network model are analyzed, which is used to realize shortest path algorithm within layered route network. Based on Beijing's monolayer route network model, an example of double layer route network model is established and applied to solve an existent problem of military material distribution. The calculation results prove that the established model meet the requirements of layered shortest path algorithm and improve the calculation efficiency of shortest distance.

Keywords: layer; route network model; shortest path; VRP

0 引言

图论和运筹学中, 对于最短路径算法的研究目前已经相当完善, Dijkstra 算法、A-Star 算法等在汽车导航以及物资调配等车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP) 求解方面已经得到成功的应用^[1-2]。对于此类算法在实际环境中的应用, 一个很重要过程是构建能表示实际道路拓扑关系的道路网络模型^[3], 从而将实际的导航或调配过程转化为图论中的最短路问题的求解。目前应用较多的是单层路网模型, 随着城市规模的扩大和交通环境的日益复杂, 路网模型中的数据量也越来越大, 单层路网模型逐渐暴露出不便于数据组织和存储的缺点, 并且最短路计算的复杂度也急剧增大。

对于大规模复杂道路网络, 使用分层路网模型是解决上述问题的一个方法, 将路网按其中的道路级别进行分解, 按不同层次和区块组织路段中的数据, 并且将最短路的计算分解为若干规模较小的阶

段问题, 可以大大减少计算的复杂度^[4-7]。

然而目前分层路网模型在城市交通中的实际应用还不多见, 一是分层路网模型中的最短路计算会带来一定的误差, 二是目前已有的城市道路数据多按单层路网模型进行组织, 将其转化为分层路网模型并不容易。笔者将建立一种适应于分层最短路径算法的路网模型, 并给出将单层路网转化为分层路网的方法。

1 分层分区路网模型

1.1 路网分层

分层路网模型所包含的道路网络拓扑信息与单层路网模型完全相同, 只是在单层路网模型基础上将道路划分为不同等级, 并以此对原有数据进行重新组织, 将每一级别的道路单独存储为一个层级, 则得到了分层路网。如图 1 所示的单层路网划分为上层路网和下层路网 2 个层级。

收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2015-01-11

基金项目: 交通运输部西部交通科技项“灾害条件下区域公路交通组织预警与应急联动技术研究”(2009318223089)

作者简介: 曹剑东(1980—), 男, 江苏人, 工学博士, 副研究员, 从事智能交通研究。

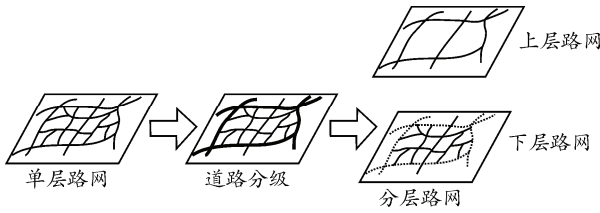


图 1 路网分层

1.2 下层路网分区

对于已经划分为不同层级的路网，由上层路网形成的自然网格将下层路网划分成了若干区域，根据此区域的不同，可以进一步将下层路网划分为若干局部子路网，则得到了一个拓扑关系与原单层路网相同的分层分区路网(如图 2 所示)。

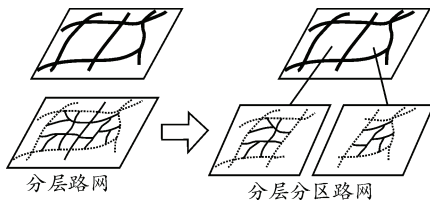


图 2 下层路网分区

2 基于分层路网的最短路径算法

基于路网分层策略的最短路径算法，是将原路网中的最短路径问题分解为不同层次和区域内的子图中的寻路问题，由于各子图的规模远小于原路网，可以大大提高计算的效率。

图 3 为一个采用双层路网模型表示的城市道路网络的局部示意图，原先整个路网模型构成一个图 G ，其中所有主干路段(图 3 中粗实线表示)构成原路网模型的一个子模型，即主干路网模型 G_F ；其他线路则构成 G 的另一个子模型，即支线路网模型 G_S ，并且根据主干路网 G_F 形成的网格，又将支线路网 G_S 划分为一系列局部支线路网模型 $G_{S1}, G_{S2}, \dots, G_{Sn}$ ，由此即构成将原路网模型进行二级分层的分层路网模型。现假设要在此二级分层路网模型中计算起始节点 O 到终止节点 D 的最短距离，首先根据 O 和 D 的具体位置分别找到其所属的局部支线路网，设为 G_{S0} 和 G_{Sd} 。 $E_1 \sim E_4$ 和 $E_5 \sim E_{10}$ 分别为其边界节点，现在可以将节点 O 到节点 D 之间的距离近似地表示为从节点 O 经由 G_{S0} 的边界点 $E_1 \sim E_4$ 进入主干路网，再经由 G_{Sd} 的边界点 $E_5 \sim E_{10}$ ，最后到达节点 D 的所有线路的最短距离，由此可以将整个路网模型中的寻路搜索过程转化为 2 次局部区域内支线路网模型中的寻路搜索过程，再加上一次大大简化了的主干路网模型中的寻路搜索过程。

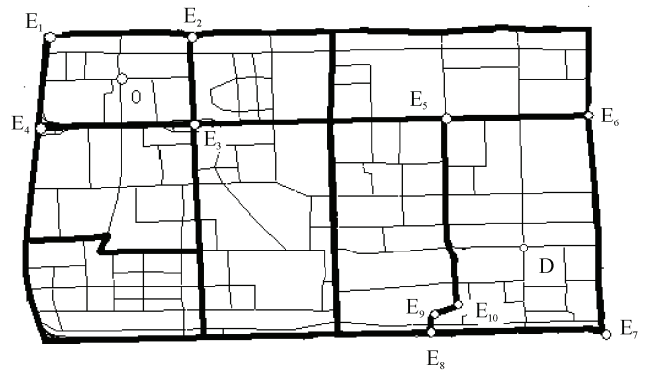


图 3 城市分层路网局部

3 路网数据结构设计

为了实现上述分层路网中的最短路径算法，所需的分层路网模型应具有如下特点：

1) 路网数据按等级分层分区组织，并且不同层级或区域间的路段通过公共节点相关联，保证路段拓扑连接关系不变；

2) 采用的数据结构可以快速的查找到某一路段所属的层级和区域，以及与其相连通的其他层级和区域的路段；

3) 路网模型应能较为容易的从普通路网模型转化得到。

一种满足上述要求的分层路网模型的数据存储结构如图 4 所示。

层级1	区域2-1	路段2-2-1	起始节点序号
层级2	区域2-2	路段2-2-2	终止节点序号
⋮	⋮	⋮	路段长度
层级n	区域2-n	路段2-2-n	⋮
			其他信息

(a) 路段

节点1	经度值	路段代码1
节点2	纬度值	路段代码2
⋮	连接路段列表	⋮
节点n		路段代码n

(b) 节点

图 4 路网数据结构

路网模型中的主要数据为路段信息，如图所示路段根据所属层级和区域的不同进行分别组织，每个区域的各个路段按顺序进行线性存储，上述结构实现了路段的分层分区组织，并且在区域和路段的代码中直接表示出了其所属的层级，即其代码同时也是索引，便于搜索过程中的查询。另外，对于每一路段的基本信息的结构与简单单层路网相同，这

便于从单层到多层的路网格式的转化。

事实上对于一个道路网络拓扑关系的表达，只要有路段的信息就已经足够了，但在此处的路网模型中，还增加了节点列表，保存了与其相关联的路段代码信息，这与路段信息中的起点和终点序号是同一关系的冗余表示，这种设计方式是为了在最短路径计算时能够方便地从节点得到相关路段的信息，以及从路段得到相关节点的信息，从而提高计算效率，属于有效的冗余，并且由于2种关系都是用相关的序号表示，增加的内存开销也相对比较小。

4 分层路网模型的优化设计

4.1 算法复杂度与路网结构的关系

对于前述分层路网中的最短路径算法，设单级最短路径算法以 Dijkstra 算法实现，则其计算复杂度可表示为

$$C = O(A_F^2) + O(\max\{A_{S_0}^2, A_{S_d}^2\}) \quad (1)$$

其中 A_{S_0} 、 A_F 和 A_{S_d} 分别表示路网 G_{S_0} 、 G_F 和 G_{S_d} 的路段总数，式 (1) 中第二项表示 2 次局部路网中的最大复杂度，考虑到起点及终点可能位于任意的局部路网，因此为使计算复杂度 C 最小，在局部路网数一定的条件下，应保证各局部路网的复杂度尽量平均，及各区域的路段总数大致相当。

增加局部路网的个数也可以降低平均局部路网的复杂度，但这同时意味着增加主干路网的路段数 A_F ，使公式 (1) 中的第一项增加，因此局部路网个数的设计需考虑二者的平衡，从理论上来说，存在一个最优的局部路网数，但由于主干路网路段数与局部路网数的关系不易表出，并且实际路网划分时难以保证兼顾局部路网的个数和平均性，因此难以求取和实现。此处给出一个粗略的划分原则：即主干路网路段数与局部路网路段数应属同一数量级，且主干路网路段数略大于局部路网路段数。

4.2 主干路网的简化

前述最短路径算法的搜索范围仅包括主干路网及起点和终点所处的局部路网，并不能保证结果的最优性，与全网路的搜索方法相比有一定的误差。上述误差主要是由搜索范围的缩小引起的，对主干路网细节的精确刻画并不能对其有多大改进，据此可以对主干路网进行进一步简化，去除冗余的细节以提高计算效率。

对主干路网的简化，依从下列原则：

1) 删除道路内部节点，合并拓扑结构相连并且

无分枝的多条道路；

2) 去除长度较短且不会改变主干路网整体连通性质的辅助性道路，如互通立交桥(如图 5 所示)等，并合并其起止节点；

3) 多车道在路网拓扑结构中表现为重复线路，故对其合并。

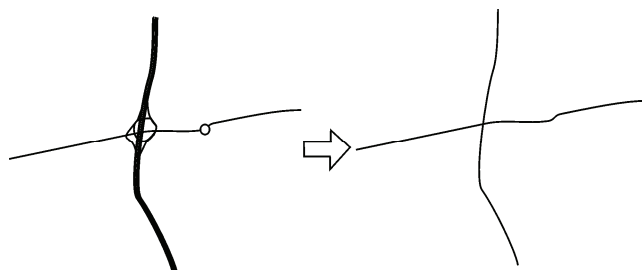


图 5 主干路网简化示意图

对于实际的城市道路网络，上述路网的简化是一个相当繁复的过程，若由人工方法实现其工作量很大，下面给出进行自动简化的实施方法。

步骤 1: 选取最小误差距离 e ；

步骤 2: 对于满足 $D(p_1, p_2) < e$ 的节点对 (p_1, p_2) ；

① 对于所有与 p_2 相关联的路段，将关联关系改为 p_1 ；

② 若两节点间存在路段，则删除该路段；

③ 删除节点 p_2 。

步骤 3: 若已遍历所有节点对，则转到下一步，否则获得下一节点对，回到步骤 2；

步骤 4: 遍历所有节点，若节点仅与两路段相关联，则删除该节点，并将 2 条路段合为一条路段；

步骤 5: 遍历所有节点对，若节点对间路段数多于 1，则仅保留最短路段，删除其他路段。

4.3 主干路网的选取

主干道路的选取原则应从 2 方面考虑：首先是对计算结果优劣的影响，其次是对计算复杂度的影响。

使用分层算法计算得到的最短路中的路段，除两端点局部部分均属于主干路网，尤其是两点距离较远的情况下，主干路网的选取对计算结果的影响尤其明显，因此主干路网应包含城市的主要交通线路，并保证其连通性，据此对主干路的选取应遵循下列原则：

1) 根据道路的自然等级信息，选择如市内高速公路、国道和省道等级别较高的道路；

2) 根据具体道路组织形态，选择对行车路线影响较大的交通枢纽道路，如立交桥等。

同时按上述原则产生的路网中计算所得的最短

路也较为符合多数人优先选择大路的行驶习惯。

主干路网的选取对计算复杂度的影响，如上文
的分析应该尽量保证主干路网以及各局部路网的路
段数大体相当，在具体实现过程中，应在上述选定
的主干道路的基础上，按下列原则选取：

1) 在已有网络的自然网格基础上，适当添加路
段到主干路网中，将整个城市路网划分为各个局部
路网；

2) 根据具体道路疏密程度，在道路密度较大的
区域适量增加主干道路的数量，以保证各个区域路
段总数大体相当。

5 分层路网的实现及应用

5.1 分层路网的实现

以北京市路网对上述方法进行了验证，所使用
的原单层路网包括北京市及郊区路网数据共有节点
数 18 759，弧段数 27 985。

首先，按前述步骤进行路网的分层和简化操作，
得到分层分区路网，如图 6 所示，其中粗线为主干
路网，其围成的区域即为各个局部次级路网，共分
为 113 个区域，城区路段密度较高，因此划分区域
较小，郊区则相应较大，保证各区域的路段及节点
数目相当。



图 6 北京市路网分层结果

路网的具体数据如表 1 所示。

表 1 北京市分层路网数据

路网	节点数	弧段数
原路网	18 759	27 985
主干路网	201	615
局部次级路网	167(平均)	245(平均)

5.2 在 VRP 中的应用

采用上述分层路网中的最短路径算法，计算一

个军队物资调配问题中的距离矩阵，即各客户点间
的两两最短距离，本例中共有 130 个不同的客户。

采用不同策略计算上述问题的结果如表 2。

表 2 计算结果比较

方法	平均绝对 误差/km	平均相对 误差/%	计算 时间/s	VRP 结果	VRP 误差/%
A	0	0	60	720.3	-
H	1.24	9.3	2	776.0	7.7

其中，表格第一列为采用的算法：A 表示在原
路网中用精确算法计算的结果；H 表示在分层路网
中用分层算法计算得到的结果。表中最后一列即为
用各方法计算出的距离矩阵得到的 VRP 问题的计
算结果，VRP 算法为禁忌搜索结合节约算法^[8]，结
果数值为将里程和固定成本加权后的当量成本值。

从计算结果来看：采用分层寻路算法对于计算
VRP 问题中的距离矩阵，存在较小的误差，且其计
算速度得到了大幅提高。

6 结论

笔者建立了一种分层分区路网模型，针对分层
最短路径算法的要求，分析了为使该算法高效实现，
路网模型应具有的特点，提出了以普通单层路网为
基础构建分层分区路网的方法，并应用北京市的单
层路网数据实现了一个两层的路网模型。基于该网
模型的实际物资调度问题求解应用实例表明：该模
型在满足最短路径算法计算精度要求的同时，可以
将距离矩阵的计算时间降低为精确算法的 1/30。

参考文献：

[1] 郑四发, 曹剑东, 连小珉. 复杂路网下多客户间最短路径的扇面 Dijkstra 算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(11): 1834-1836.

[2] 郑四发, 曹剑东, 连小珉, 等. 市区集送货问题的随机合理化禁忌算法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(7): 1688-1692.

[3] 丁捷, 杨殿阁, 颜波, 等. 汽车导航用电子地图的高效路网模型[J]. 汽车工程, 2003, 25(03): 232-235.

[4] 黄斌, 孙永荣, 王丽娜, 等. 多层次约束的矢量地图匹配导航算法[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(8): 1173-1176.

[5] 周巍, 沈永增, 王燕, 等. 嵌入式 Linux 导航电子地图数据的组织及应用[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(4): 37-40.

[6] 杨永勤, 褚世新, 刘小明. 城市路网的层次性研究[J]. 道路交通安全, 2006, 6(2): 12-15.

[7] 武雪玲, 李清泉, 任福. 基于分层分块数据组织的双向 A*算法[J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(6): 1-2.

[8] 曹剑东, 郑四发, 李兵, 等. 动态车辆调度系统设计与开发[J]. 计算机工程, 2008, 34(7): 280-282.