

# 交通诱导系统中道路网络的表达与存储方法

姜桂艳, 郑祖舵, 于妍霞

(吉林大学 交通学院, 长春 130022)

**摘要:**考虑实际道路网络的特殊性以及最短路径算法对路网信息的要求,运用对偶图法的基本思想对前向关联边结构进行了改进,提出了一种能够提高路径优化算法实时性的路网表达方法与数据存储结构,并用 Dijkstra 和  $A^*$  最短路径算法进行了验证。结果表明,这种方法在清楚表达转向限制、消除结点权重的同时,由于两个指针数组的引入,使得算法可以迅速而准确地定位相关结点的位置,从而减小了搜索空间,降低了最短路径算法的时间复杂度,提高了最短路径的搜索效率。

**关键词:**交通运输系统工程;交通诱导;最短路径;路网表达;数据结构

**中图分类号:**U491.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)04-0797-05

## Representation and storage method for road network of traffic guidance system

JIANG Gui-yan, ZHENG Zu-duo, YU Yan-xia

(College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Considering the particularity of the road network and the demand of the shortest path algorithm for the road network information, a new method of representation and storage of the road network to enhance the real-timeness of the shortest path algorithm was proposed based on the basic idea of the dual graph representation to improve the forward star structure. The method was tested against the classic shortest path algorithms such as Dijkstra and  $A^*$ . The results show that the method can clearly express the connectivity of the road network, eliminate its node weights, reduce the time complication degree and the search space, enhance the search efficiency of the shortest path algorithm due to the introduction of two pointer-arrays which make the node locating fast and accurate.

**Key words:** engineering of communications and transportation system; traffic guidance; shortest path; representation of road network; data structure

道路网络的计算机表达与存储方法不但对路径优化算法的性能有重要影响,而且是车辆定位、地图匹配以及路径引导的基础。在图论中虽然有诸如 DIJKSTRA、 $A^*$  等经典的路径优化算法,但实际应用时实时性较差,主要原因有 3 个:

①路网是有向图;②路网交叉口与图论中的结点不同,它本身具有权重且常常不唯一;③路网中存在各种转向限制。针对上述交通诱导系统中的问题,通常有两种解决思路:一是从路径优化算法研究入手,对其结构进行改造,使之适合于实际道路

收稿日期:2007-02-15.

基金项目:博士学科点专项科研基金项目(20070183129);“863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z245).

作者简介:姜桂艳(1964-),女,教授,博士生导师.研究方向:交通信息工程. E-mail:jianggy@public.cc.jl.cn

网络的特性;二是从道路网络的表达方法入手,对路网进行适当的简化,并采用合理的手段对其连通性进行表达和存储,使之满足最短路经典算法的需要。

许多具有数学专业背景的研究者从第一种思路入手对路径优化的经典算法进行改造,提出了许多改进的算法<sup>[1-3]</sup>。但到目前为止,尚未见到公认有效的路径优化改进算法。这是因为已有的经典算法在处理静态最短路问题时的效率已经非常高,在此基础上对其进行改进难度非常大。于是,越来越多的人将注意力转向第二种思路<sup>[4]</sup>。作者就是基于第二种思路,提出了一种能够提高路径优化算法实时性的路网表达方法与数据存储结构,并用 Dijkstra 和 A\* 路径优化算法进行了验证。

### 1 基本术语

道路网络是一种特殊的有向图,研究路网的简化、连通性的表达及其存储问题不可避免地要涉及到图论的知识。受篇幅限制,本文所涉及的相关概念请参考文献<sup>[5]</sup>。下面仅对本研究中界定的结点、路段以及路网连通性的概念进行介绍。

路网中的结点通常是指交叉口。但从路径优化角度看,结点还应包括道路特性发生变化的点以及可能进行转向操作的点。道路的所有车道合在一起,在两结点之间的部分形成一个路段。路段常用边(弧或链)表示。

路网的连通性是指路网拓扑结构中的相邻性和实际交通行为中的可达性。前者是指路段和结点之间的邻接关系,是较低层次的连通性,可利用一般的网络表示法表达。但从路径优化的角度看,仅有这一层次的连通性表达是远远不够的。由于交通管制措施的存在,使得某些直观上连通的路线在实际交通中却是不可达的。实际交通行为中的可达性是专门针对这种情况提出来的,是一种较高层次的连通性。只有把该层次的连通性表达清楚,才能满足路径优化的需要。

### 2 路网简化及连通性表达方法介绍

在路径优化算法研究中,常采用增设虚拟边法和对偶图法表达道路网络的可达性。

#### 2.1 增设虚拟边法

这种方法是通过将交叉口进行扩展,将其中每个转向都虚拟为一条边。即将有转向限制的 1

个结点拆分为 8 个虚拟结点,分别代表交叉口的 4 个进口引道和 4 个出口引道,在虚拟结点之间构造虚拟边,用来表示转向行为,并且将结点的转向权重转化为虚拟边的权重<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。

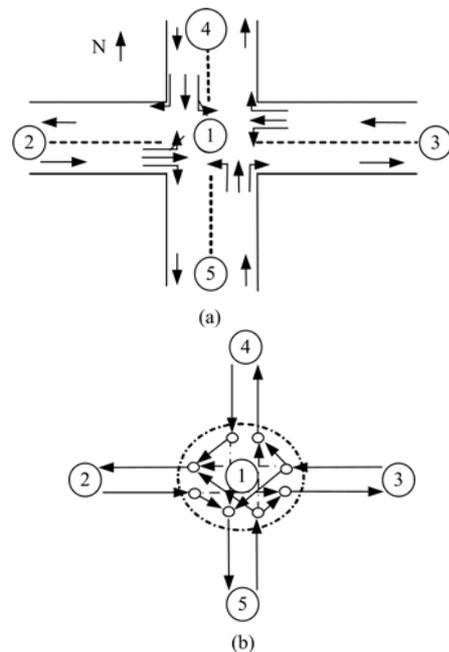


图 1 增设虚拟边法示意图

Fig. 1 Sketch map of extended node representation

增设虚拟边法的主要优点是能够清楚表达转向限制,消除结点权重,而且没有对路网结构进行大幅度的改变,路网的易读性未受到损害。在 Advance 项目中便采用了增设虚拟边法对路网进行表达,但被称为“交叉口延伸表达(Extended intersection representation)”方法<sup>[6]</sup>。然而,这种方法的缺点也很明显。如果将掉头算在内,交叉口每个引道有 4 种可能的转向行为,这意味着要增设 16 条虚拟边、16 个虚拟结点。对于包含大量交叉口的实际路网,由于需要增设大量的虚拟结点和虚拟边,从而占用较大的存储空间,大大降低了路径优化算法的计算效率。此外,由于路径优化的搜索空间夹杂着大量的虚拟边和虚拟结点,故路径优化结果的可读性较差,难以满足交通诱导的要求<sup>[7]</sup>。因此,作者不对这种方法进行深入研究。

#### 2.2 对偶图法

道路网络可达性的另一种典型表达方法是对偶图法。对偶图法由 J. Anez 等<sup>[7]</sup>于 1996 年作为一种能够表达转向限制的路网表达方法提出,其实质是将基于结点的图转换为基于边的图,通过所谓的对偶链(Dual links)巧妙地将交叉口的各

种转向限制清晰地表达出来,而且转向限制越多,其存储量越小。

对偶图法如图 2 所示,主要有两个特点:①用点表示边,并保留边的所有特征;②用边表示转向行为。

在图 2 中,上图所示的结点 1 和结点 2 之间的路段经过对偶图法转换之后,在下图中分别用结点 12 和结点 21 表示;经过结点 2 和结点 1 左转到达结点 4 的路径在对偶图中用结点 21 和结点 14 之间的弧表示。这样,不但表达了转向行为,而且将结点权重相应地转化为弧的权重。

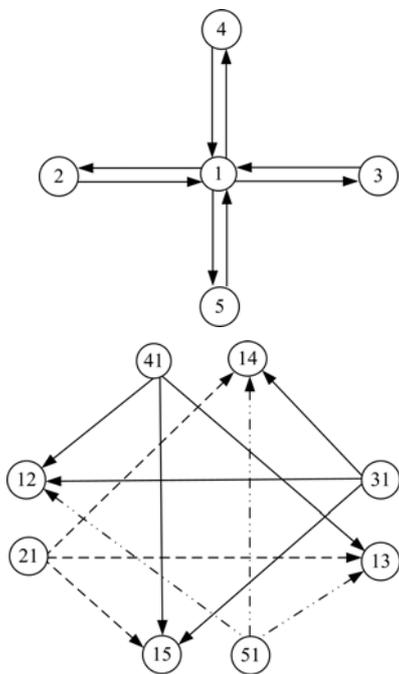


图 2 对偶图法示意图

Fig. 2 Sketch map of dual graph representation

对偶图法的缺陷在于它从根本上改变了路网的拓扑结构,转换后的路网常常比较复杂,可读性很差。但由于这种方法能够在实现消除结点权重、表达转向限制的同时,完全避免了增设虚拟边法路径优化结果中包含大量虚拟结点和虚拟边的不足,因此,作者将其作为路网连通性表达的主要手段。

### 3 传统的路网存储机制及其改进

在图论中,图的存储方式有邻接矩阵、邻接表和前向关联边三种基本结构。由于道路网络是大型稀疏网络,具有转向限制、结点带有权重等特点,用前两种基本结构存储路网数据都难以满足交通诱导系统的要求。所以,作者重点对前向关

联边结构进行分析,并以此为基础提出一种新的路网信息存储方法。

#### 3.1 前向关联边结构

前向关联边结构是当前最常用的一种路网存储方式,该方法最早由 Dial 等<sup>[8]</sup>于 1979 年提出。

前向关联边结构中主要有两个数组,一个用来存储与弧有关的数据,另一个用来存储与结点有关的数据。路网中所有有效的弧以特定的顺序排列在表中。这种方法的核心思想在于将由同一个结点出发的所有弧放在一起,其成功之处在于引入了一个非常关键的概念——指针(Pointer),记录每一个结点在所指向的结点数组中第一次出现的位置。

在图 3 所示的抽象路网中以结点 1 为例,它与结点 2 和结点 3 相连,所以“前向结点”(Pointednode)数组中有结点 2 和结点 3;假设从结点 1 到结点 2 以及从结点 1 到结点 3 的平均行程时间均是 3 min,则“路阻”(linkcost)均为 3。其中,结点 2 和结点 3 在 Pointednode 数组中最先出现的位置为 1,所以结点 1 的“结点指针”(nodepointer)为 1。其余结点依次类推,便可得到如图 4 所示的前向关联边结构。

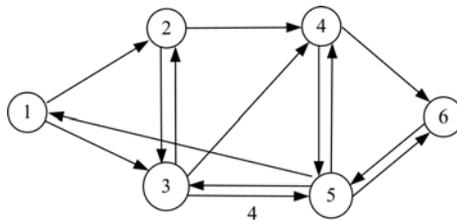


图 3 路网抽象图示例

Fig. 3 Example of road network

node	nodepointer	pointednode	linkcost
1	1	2	3
2	3	3	3
3	5	4	4
4	8	3	5
5	10	2	5
6	14	4	6
		5	4
		5	5
		6	3
		1	6
		3	4
		4	5
		6	3
		5	3

图 4 前向关联边结构

Fig. 4 Forward star structure table

前向关联边结构不但节省了存储空间,而且在表示路网结构的同时,还暗含了交叉口的转向行为,大大缩小了路径优化算法的搜索空间。其缺点是不能表达转向限制和交叉口各流向的延误,因此还不能完全满足路径优化经典算法直接应用的需要。

### 3.2 改进的前向关联边结构

分析路网连通性的表达和路网数据的存储方式可以发现,在这两个领域内都有公认的研究成果,每个领域的研究人员都在试图单独解决路径优化经典算法在实际路网中的直接应用问题,但效果都不够理想。因此,作者第一次提出了将对偶图法与前向关联边结构相结合的思想,充分利用前者能够清楚表达转向限制与消除结点权重和后者可以大大节省存储空间的优点,提出一种可以提高路径优化经典算法实时性的路网表达方法与数据存储方法,将其称为改进的前向关联边结构。这种方法的目的是清楚表达转向限制、消除结点权重,并且尽可能减少路径优化的搜索空间,降低路径优化算法的时间复杂度。

为了实现前向关联边结构和对偶图法的结合,提出了一个重要概念——弧结点,用其代替前向关联边结构中结点的概念与用途。这种新方法的具体流程如下。

- (1)采用对偶图法对路网进行转换。
- (2)运用前向关联边结构的思想和弧结点的概念建立基本数据表。
- (3)对基本数据表进行补充,针对路径优化计算的需要,加入其他字段。

与前向关联边结构相比,本文方法增加的关键字段主要有弧结点(arcnode)、前向弧结点(pointedarcnode)、弧结点指针(arcnodepointer)以及其他与诱导有关的交通信息。

## 4 应用举例

### 4.1 道路网络的表达与存储结构

下面以图 3 所示的抽象路网为例,简要说明所提出方法的具体实现过程。

步骤 1:在实际路网的基础上建立如图 3 所示的抽象路网。将交叉口表示成结点,将路段表示成有向弧,并在各弧段上标明路段的路阻(在本例中取路段平均行程时间)。为简单起见,图 3 仅标出结点 3 至结点 5 的平均行程时间(4 min)。

步骤 2:采用对偶图法,建立转换路网,如图 5

所示。在每个结点内标出路段的路阻,在每条弧段上标出转向延误,即交叉口的权重。例如从路段 35 左转至路段 54 的转向延误为 1.5 min,从路段 35 右转至路段 56 没有转向延误(即转向延误为 0)。

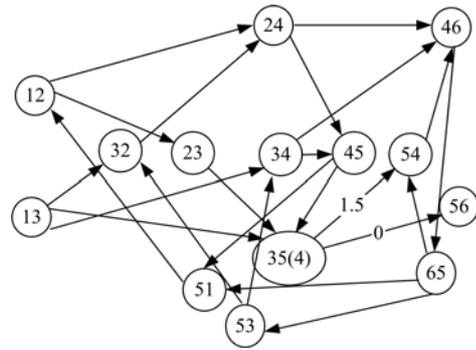


图 5 转换路网示意图

Fig. 5 Dual graph representation of road network

步骤 3:对前向关联边结构进行改进,以弧结点为核心建立数据表,如图 6 所示。

arcnode	linkcost	Arcnode pointer	Pointed arcnode	weight
12	3	1	24	4.0
13	3	3	23	3.5
24	4	6	32	4.0
23	5	8	34	4.5
32	5	9	35	3.5
34	6	10	46	5.0
35	4	12	45	5.5
(...)	(...)	(...)	35	6.0
			24	5.5
			45	6.5
			46	7.5
			54	5.5
			56	4.0
			(...)	(...)

图 6 改进的前向关联边结构(部分关键字段)

Fig. 6 Improved forward star structure (part of key fields)

以路段(即 arcnode)35 为例,它可以到达的路段(即 pointedarcnode)有路段 56 和路段 54,其中路段 54 在 pointedarcnode 数组中首先出现的位置为 12,则与其相关的 arcnodepointer 为 12。从路段 35 转向至路段 54 的路阻等于路段 35 的路段平均行程时间与左转延误时间之和,即  $4 + 1.5 = 5.5$  min。其他弧结点(路段)依次类推。

需要特别指出的是,图 6 只是整个改进的前向关联表结构中的部分关键字段。考虑到路径优化经典算法应用的具体要求,还应该加入其他字段,对图 6 进行扩充,比如可以加入结点的坐标信息,还可以对弧结点进行二次简化等。限于篇幅,

这里不再展开论述。

#### 4.2 路径优化经典算法的程序实现

为了验证所提出的路网表达与存储方法的性能,按照上述步骤,针对图 7 所示的路网建立了相应的数据库。测试路网共有 93 个交叉口,重点考

虑了左转限制、不同的交叉口型式、各种常见立交桥、单行线限制、快速路出入口等情况。并在此基础上,对 Dijkstra 和 A\* 两种算法进行了测试。

结果表明,在未对这两种路径算法本身作任何改动的前提下,算法得以成功运行,准确地搜索

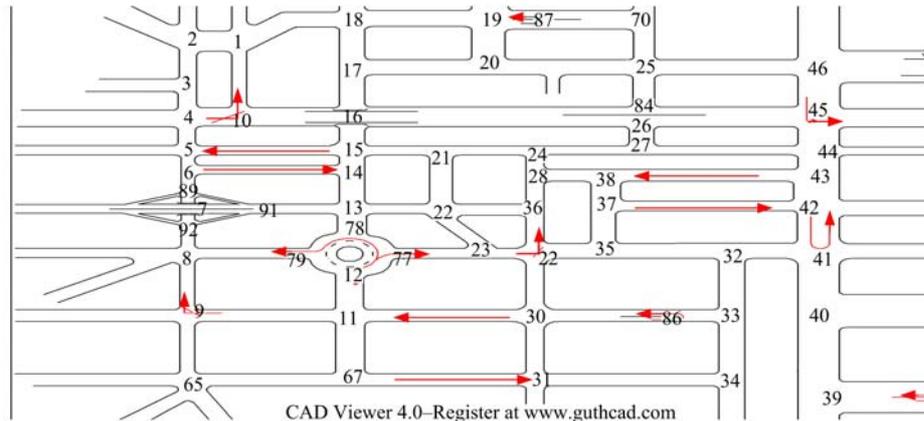


图 7 测试路网抽象图(部分)

Fig. 7 Part of road network for testing

出了最优路径。而且由于两个指针数组的引入,使得算法可以迅速而准确地定位相关结点的位置,从而大大减小了搜索空间,路径优化的搜索效率得到了显著提高。例如,假设每个节点的子结点最多为 5 个(这对现实路网是合理的),采用改进的前向关联边结构之后,Dijkstra 算法的时间复杂度由  $O(n^2)$  降至  $O(5n)$ 。

## 5 结束语

动态交通诱导系统的效果取决于路径优化的质量和速度。作者针对道路网络的复杂性,对传统的路网表达与存储方法进行了分析,明确了原有方法的优点与不足,并基于对偶图法和前向关联边结构提出了一种路网表达与数据存储的新方法。实验表明,这种方法在清楚表达转向限制、消除结点权重的同时,可以大大节省存储空间,降低路径优化经典算法的时间复杂度。

#### 参考文献:

- [1] 王杰臣,杨得志,张伟. 最短路径问题的一种改进算法[J]. 解放军测绘学院学报,1999,16(4):282-285.
- [2] 王晓丽,杨兆升,吕旭涛,等. 平行四边形限制最短路径算法及其在交通网络中的应用[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(1):123-127.
- Wang Xiao-li, Yang Zhao-sheng, Lü Xu-tao, et al. Shortest path algorithm based on limiting parallelogram and its application in traffic networks[J]. Journal of Jilin U-

niversity(Engineering and Technology Edition), 2006, 36(1):123-127.

- [3] 靳凯文,李春葆,秦前清. 基于蚁群算法的最短路径搜索方法研究[J]. 公路交通科技,2006,23(3):128-134.
- Jin Kai-wen, Li Chun-bao, Qin Qian-qing. Study on shortest path search method based on ant algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3):128-130/134.
- [4] 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.
- Lu Feng. Shortest path algorithms: taxonomy and advance in research[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2001, 30(3):269-275.
- [5] 张可. 车辆导航系统关键技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2001.
- Zhang Ke. Research on key technologies of vehicle navigation system[D]. Beijing: Beijing Polytechnic University, 2001.
- [6] Boyce David E, Lee Der-Horng, Janson Bruce N, et al. Dynamic route choice model of large-scale traffic network[J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 123(4):276-282.
- [7] Anez J, Barra T, Perez B. Dual graph representation of transport networks[J]. Transportation Research-B, 1996, 30(3):209-216.
- [8] Dial R B, Glover F, Karney D, et al. A computational analysis of alternative algorithms and labeling techniques for finding shortest path trees[J]. Networks, 1979, 9(9):215-248.