

基于公交网络模型的最优出行路径选择的研究

翁 敏¹ 毋河海¹ 杜清运¹ 蔡忠亮¹

(1 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 在讨论公交网络特性的基础上, 基于结点-弧段-有向线描述了公交网络的数据组织, 研究综合换乘次数及距离因素的出行路径选择模型, 并提供算法的实现。

关键词: 最短路径; 公交网络; 出行路径选择模型; 最少换乘

中图法分类号: P208; U121

在已有公共交通条件下, 设计合理的公交出行路径有助于人们选择出发时间、出行线路和换乘方案等。公交出行路径选择实质上是研究乘客出行在公交网上的分布规律, 即研究乘客给出起迄点后, 如何自动生成最优的出行路径方案。城市公交线网是分布在城市道路网上的, 它是若干不同公交线路的集合。每条公交线路又是由起迄点及其间的若干个空间位置不同的站点连接而成, 因此在庞大复杂的公交线网中, 乘客从任意起点出发到目的地之间路径的选择不是惟一的。文献[1]对乘客的出行心理进行了调查分析, 其结果表明, “换乘次数”是大部分公交乘客在选择出行方案时首先考虑的因素, “出行距离最短”为第二目标。现有的出行路径选择模型多为基于上述三种目标的单一模型, 并且现有最短路径算法基本上是在道路网上进行的, 不可能直接应用于公交网络寻优^[2], 且公交网络也不同于一般的道路网络。本文在讨论公交网络特性的基础上, 提出适于公交网络的数据组织, 研究综合换乘次数及距离因素的出行路径选择模型, 并提供算法的实现。

1 公交网络的特点

公交网络不同于一般的道路网络, 它有如下特点。

1) 连通性^[2]。城市道路网络中的道路交叉点无差异地连接着与该路口连通的多条路段, 在道路网上连通的两结点, 在公交网上不一定连通, 如有

道路连接而无公交车到达的某两点。在公交网络中, 多条公交线路虽然可以相交于空间上的同一个点, 但是该点不一定是公交停靠站点, 或者不是同时有站点, 因而不同公交线路在此是不连通的。公交网络中结点的连通状态有三种: ① 同路公交线路段的连通; ② 不同公交线路路段在同一点通过换乘实现连通; ③ 不同公交线路路段在不同点的连通, 此种情况需要换乘多次车, 增加了时间的消耗。

2) 结点性质。① 空间位置特性。在同一条道路上行驶的不同公交线路在行程上是有部分重叠的, 但各自的站点不可能完全重叠, 因而在公交网络分析中, 就要求把空间上适当距离内的异线近邻同名站点按一定原则^[3]抽象成网络图上的相关结点, 从而模拟不同公交线路之间的换车情况。② 一对多属性。在公交网络中, 结点与属性之间为一对多的关系。道路网中空间位置和属性相同的同名站点, 在公交网络中因位于不同的公交线路而性质和权值可能不一样。在公交网络描述中, 可用结点权函数设置不同的值来模拟实际情况。

3) 弧段性质。在公交网络中, 弧段与属性之间为一对多的关系。如在城市中, 一般情况下, 一路公交线路有两个行驶方向, 因而在图结点上, 每个方向上各有一条出边和入边, 共四条边。而同一条道路上有若干条公交线路, 因而对于相邻两站点之间就有多条弧段的情形, 弧段数由通过的公交线路数 n 决定。一般情况下为 $\text{num} = 2n$ 。有着相同空间位置的弧段, 可用弧段结构惟一地确定, 当为每条道路网中的弧段匹配上公交属性时, 弧段与属性之间为一

对多的关系。为了表达这种一对多的关系,当每条公交线路通过这段弧段时,都需要重复记录弧段的空间信息,这就会产生大量的冗余数据。

4) 有向线性质。实际的公交线路是有方向的,起点和终点决定了公交线路的行驶路径和方向。不同的公交线路有不同的行驶路线和方向,即使同一路公交车,其上行车和下行车行驶的路径和停靠站点也可能不完全重叠,所以公交网络图应是有方向的,这种方向性无法用边的有向性来体现。所以在公交网络中,应引入有向线路集,而空间位置相同的结点和弧段的性质和权值在不同路线上是不同的,另外,在同一道路上平行行驶的多条线路的停靠站点和数目是不同的,这些差异只有在有向线中才能体现。

2 公交网络模型描述

2.1 公交网络的几何描述

在 GIS 网络分析中,地理网络总可以映射为一个有向图。同理,为了合理地选择公交出行路径,根据上述分析,把公交网络映射为 $G=(V, E, R, W_v, W_e)$, 其中, G 为有向赋权图; V 表示网络上所有结点即公交站点的集合,一个公交站点可能是多条线路的上下客站点; E 表示网络上所有边(连接任意两个公交站点之间的弧段)的集合,若 A 站点与 B 站点是 n 条线路的相邻上下客站点,那么 A 与 B 之间至多有 $2n$ 条连接边; R 表示网络上连接起迄点间所有结点的公交线路 R_i 的集合; W_v 是结点的非负权值; W_e 是边的非负权值。最优出行路径就是指乘客从起始点到终迄点所选择的一系列连通结点组成的距离最短的路段及最少换乘的公交线路的集合。

2.2 公交网络的拓扑表示

用几何描述的公交网络由线性特征和点状特征组成,是实际地理特征的图形化表示。结点-弧段联合结构是 GIS 表达道路网络的一种常用逻辑数据模型,该模型用一组弧段组成,而弧段由构成网络线的一组有序坐标对组成,其中弧段的两个端点称为结点,与线性特征相关的属性信息存储在与弧段相关联的属性表中。针对以上公交网络特性分析,传统的结点-弧段图结构在描述公交网络、表达公交线路站点及弧段多属性方面存在一定的问题,并且不利于最优出行路径及换乘方案的查询,所以本文对该模型作了必要的扩展,用结点-弧段-有向线联合结构来表示复杂的公交网络,在该结构中引入了一个新的数据类型——有向

线来对应公交网络中的公交线路,同一公交线路的上行线和下行线用不同的有向线来描述。在每条有向线的内部:① 通过结点索引区分线路的起始站点、中间站点和目的站点,从而为结点赋权;② 弧段-属性的一对多关系被转化成有向线-属性的一对一关系,这样,属性数据的存储就克服了冗余;③ 选择需要停靠的站点作为有向线的结点,把经过但不停靠的站点作为其弧段内点;④ 实际上,有向线采用索引方法记录了结点和弧段的索引,不需要记录有向线所经由的各个结点和弧段的空间位置,也不需要对其底层的几何要素作任何修改,可以很好地维护原有图层的拓扑关系。通过对结点-弧段-有向线逻辑结构的描述,可用公交站点表、站点与站点之间的连接弧段表、公交线路表来拓扑表示公交逻辑网络,如图 1 所示。

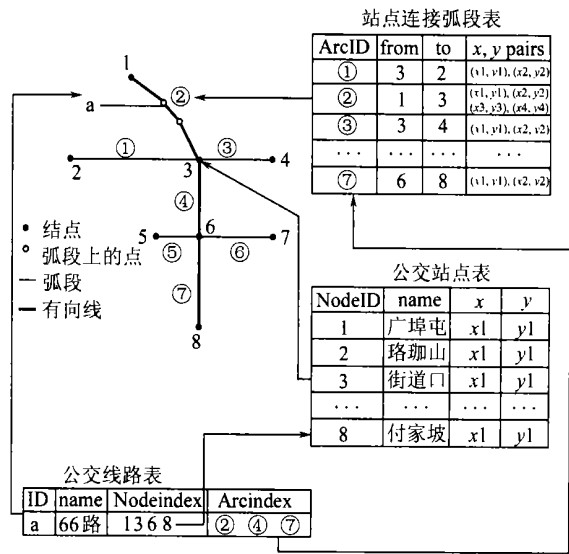


图 1 公交网络的拓扑表示

Fig. 1 Topological Expression for Public Traffic Networks

3 公交出行路径选择算法思想

公交出行路径的选择就是用户从起点出发到目的地,究竟选择乘坐哪路公交车,如何换乘才最方便。因此,现在的问题是在已经建立好的公交网络上寻找一条换乘次数最少、距离最短的路径。现有的出行路径选择算法一般有两种模式:① 以换乘次数为代价换取空间上的距离最短^[3];② 以算法搜索时间为代价换取换乘次数最少^[4]。在模式①中,起迄点之间的最短路径已确定,需要在该路径上匹配公交线路实现两点之间的连通,搜索效率较高,但结果不一定理想。因为一条路径路程值最短,但必须换乘多次车才能到达,而另一条路径路

程较长,却只要转乘较少次车就能达到,那么乘客大部分会选择后者,因为换乘所带来的不便和不可预期的等待时间往往是人们力图避免的。所以很多学者采用模式②,在这种模式中,需要集合的逐步扩展、排序、求交等,对于小城市的公交网络可能在搜索时间和空间上可以忍受,但对复杂而庞大的大城市公交网络来说,对每条公交线路进行操作是不太现实的,并且该种模式并不考虑距离。也就是说,只要起迄点之间通过较少换乘能实现连通,无论多长的距离都是允许的。但在人们的实际出行中,还是希望能快速地(一般可通过距离来体现)到达目的地,并且在城市道路规划中,公交网络的线路分布一般都是基于最短路径布线的^[5]。所以,本文针对人们的出行心理、公交线网的实际布线原则以及在笔者已有的研究基础上^[3],提出了一种在基于最短路径上对集合向外扩展、两个集合之间逐渐逼近的搜索方法。在算法中,判断的原则是优先考虑换乘次数少的路径,在换乘次数相同的情况下,再考虑出行距离最短。

根据图 2 所示的公交网络,由最短路径上映射的公交线路和公交站点建立它们之间的关联矩阵 C , $C = \{C_{ij} | R_i \in R, i = 1, 2, \dots, n; P_j \in P, j = 1, 2, \dots, m\}$, C_{ij} 为站点权值,可根据相应的站点性质由权函数赋值。简单情况下,若 R_i 路公共汽车在 P_j 站点处停靠,则 $C_{ij} = 1$, 否则 $C_{ij} = 0$ 。在行驶方向上,对 C 矩阵逐列累加和得到一新矩阵 T , $T = \{T_{ij} | T_{ij} = \sum_{k=1}^i C_{kj}, j = 1, 2, \dots, n\}$, C 和 T 如图 3 所示。算法基本思想为:① 根据 T 判断是否有直达车, R_1 为直达车,则为最优方案;② 如果不满足①(假设 R_1 不存在),扩展起点线路集合,即搜索通过该点的任意路径上所有公交线路的总和 $A_k \{R_2, R_3, R_4, R_6\}$ 和终点集合 $C_k \{R_3, R_5, R_7\}$, 并判断是否有相交线路集合, $\{R_3\}$ 为交集,则 R_3 为非最短路径上的直达方案;③ 如果不满足②(假设 R_3 不存在),根据 T 判断在最短路径上是否有换乘一次的方案(无)。如果 A 、 B 之间有直达车,在 B 点处对 A_k 集合部分(同时通过 A 、 B 的线路集合 $\{R_2, R_6\}$)向外扩展成 $B_k \{R_2, R_6, R_7, R_8\}$, B_k 为通过 B 点的所有公交线路集合,它逐渐向 $C_k \{R_5, R_7\}$ 逼近,最终到达 C_k , 即有交集 $\{R_8\}$ 。因此,从起点 A 处乘 R_2 、 R_6 , 在 B 处换乘 R_8 , 可到达终点 C 。

4 算法实现

具体的算法步骤如图 4 所示。从图 4 可看

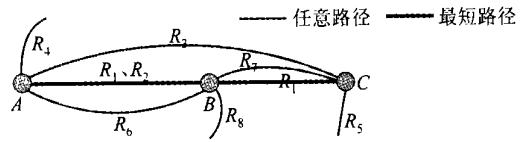


图 2 公交网络示意图

Fig. 2 Sketch Map of Public Traffic Networks

线路	R_1	R_2
站点		
A	1	1
B	1	1
C	1	0

C

线路	R_1	R_2
站点		
A	1	1
B	2	2
C	3	2

T

图 3 关联矩阵 C 和新矩阵 T

Fig. 3 The Associated Matrix C and New Matrix T

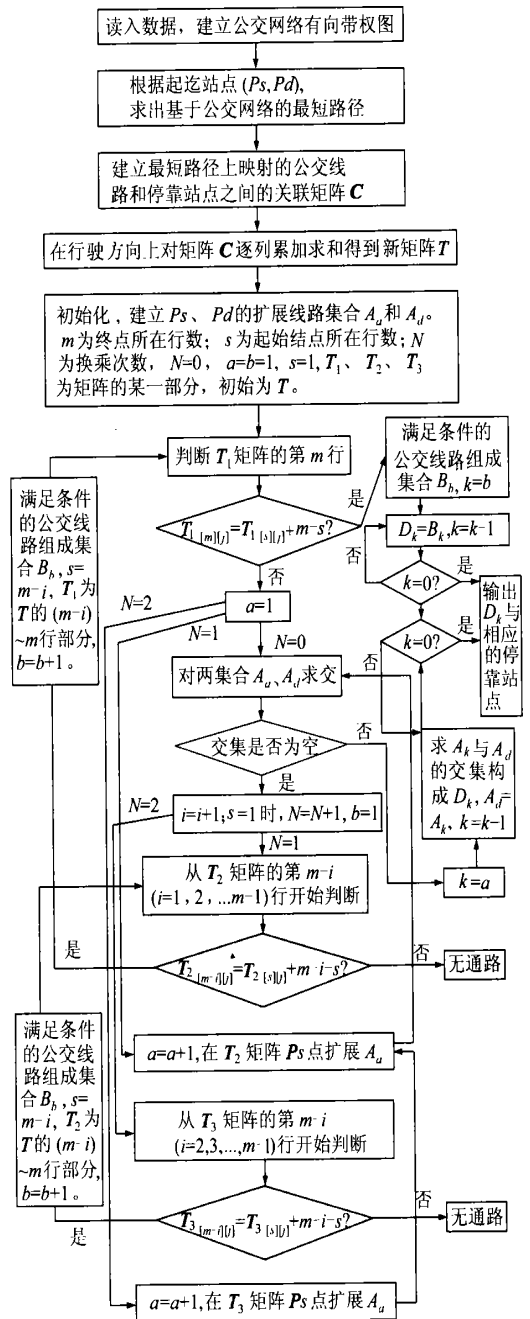


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow Chart of Algorithm

出, 在讨论 $N=2$ 时, 必须调用 $N=1$ 的情况; 在讨论 $N=1$ 时, 必须判断直达的情况, 以此类推。显然, 这是一个递归问题。第 N 次换车表示为第 $N-1$ 次换车的函数, 而第 $N-1$ 次换车的情况仍然不知道, 还要回推到第 $N-2$ 次换车, 直到知道直达的情况。

5 实 验

本文的算法已应用于 Atlas2000 中, 在该电子地图中, 只要输入起点和终点的信息, 就可获得两点之间的最短路径及出行路径选择方案。从提供的乘车方案看, 该软件能实现整条换乘线路的展示, 具有一定的优先推荐能力, 在相同换乘条件下, 基于最短路径上换乘次数最少的选择应是最佳方案, 并提供车次、换乘车站名及途经车站总数等信息, 如图 5 所示。

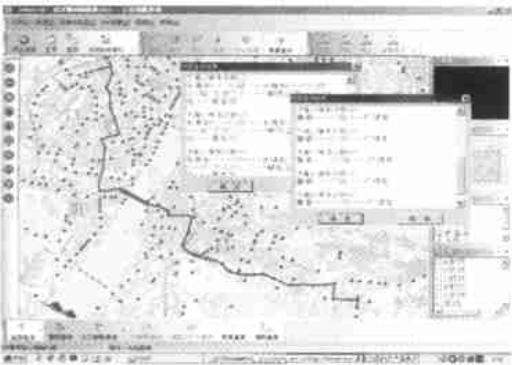


图 5 公交路线最优出行路径选择
Fig. 5 Optimal Route Choice

但对于复杂的公交网络来说, 乘车方案的选择不仅依赖于用户的实际取向, 还与拥挤情况有关, 所以在考虑最佳乘车方案时, 所涉及的因素很多, 如路面交通状况(包括发车频率、拥挤度等)、车站上的等车时间、转乘车行走的距离、交通费用等。在本文研究的基础上, 还应考虑多因素对用户选择乘车方案的影响, 判断各种条件下乘客的路径选择的原则, 提出通用模型和算法, 以满足用户各种形式的需求。

参 考 文 献

1 杨新苗, 王 炜, 马文腾. 基于 GIS 的公交乘客出行路径选择模型. 东南大学学报·自然科学版, 2000, 30(6): 87~91

2 陆 忠, 钱翔东, 张登荣. 基于最短路径查询的城市公交网络拓扑建模研究. 遥感信息, 2001, (1): 11~14

3 翁 敏. 公交线路网络分析的若干关键技术研究: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000

4 傅冬锦. 交通系统中最少换乘算法及其实现. 华侨大学学报·自然科学版, 2001, 22(4): 348~350

5 陈洪仁, 冯树民. 分层限制的公交网优化模型. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(5): 113~115

6 Hall R W. Route Choice and Advanced Traveler Information Systems on a Capacitated and Dynamic Network. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1996, 4(5): 289~306

第一作者简介: 翁敏, 博士生。现主要从事电子地图、GIS 空间分析方面的研究。
E-mail: wengmin@telecarto.com

An Optimal Route Choice Based on Public Traffic Network Model

WENG Min¹ WU Hehai¹ DU Qingyun¹ CAI Zhongliang¹

(1 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: On the basis of the attribute of the public traffic networks, this paper puts forward “Node-Arc-Directional route”, explores the route choice model based on the combination of number of changing bus and the distance, and provides the algorithm to optimal route choice. Its application to Atlas2000 shows that it is efficient and practical.

Key words: shortest path; public traffic networks; route choice model; least transfer

About the first author: WENG Min, Ph D candidate, majors in the electronic map, spatial analysis of GIS.
E mail: wengmin@telecarto.com

(责任编辑: 晓平)