

基于有向层次模型的城市常规公交出行路径优化

黄正东^{1,2} 李 丹³ 周玉红¹

(1 武汉大学城市设计学院,武汉市东湖南路 8 号,430072)

(2 武汉大学交通研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 安徽农业大学林学与园林学院,合肥市长江西路 130 号,230036)

摘 要:基于 GIS 多层次的公共交通实体数据模型,引入了基于距离的换乘延误,对公交网络要素属性逐步更新,提出了以换乘可比距离为依据、循环优化的分析方法。城市公共交通规划中的分配模型及出行优化过程中都需要考虑公交换乘问题,传统的处理方式一般不考虑换乘延误或采用平均换乘延误进行估算,难以精确地获得最优公交出行路径的换乘信息。基于空间数据建模技术,可以对公交实体要素进行多层次表达,其中有向层次数据模型为精确计算换乘延误提供了可能。

关键词:公交层次模型;换乘距离;最优路径算法

中图法分类号:P208

1 基于 GIS 的多层次公交网络

1.1 多层次公交实体数据模型

在公交出行信息系统中,参照城市道路网建立的公共交通数据库是整个系统的数据基础。公交实体数据表达的适当与否直接影响到公交数据库的使用效率。因此,在构建公共交通数据库时,关键问题是妥善处理公交站点、公交线路等空间实体及其与道路网络的关联与更新^[1-3]。为详细地描述城市公共交通系统复杂的实体关系,需要以公交为主体进行建模分析,建立多层次的公交数据模型。

多层次公交数据模型以公交线路和公交站点为基本对象,分别在语义、虚拟和有向 3 个层次上进行描述^[4]。

1) 语义层次(semantic level)。语义线路和语义站点是带有名称属性的非空间对象。语义线路可标识去行与回行方向,其中的站点是有序的;也可简单表示为一个方向站点的集合。语义层次中不需要对线路和站点的空间位置进行描述,因而可通过关系数据库实现。

2) 虚拟层次(virtual level)。公交线路用无

向线状要素来表示,称为“虚拟线路”;公交站点是相关站牌点的抽象集中点,用点状要素表示,称为“虚拟站点”。虚拟线路是无向的,同时代表公交线路两个方向,因此,不能表示去行与回行线路在空间分布上不一致的状况。

3) 有向层次(directional level)。通过对实际存在的公交实体要素进行详细的空间位置描述,用公交车辆实际运行的线路轨迹即有向线状要素,表示有去和回行之分的公交线路,称为“有向线路”;用点状要素表示有向线路停靠站点的站牌实际竖立的地点,称为“有向站点”。

在 GIS 系统中,虚拟站点与有向站点通过空间关系进行绑定,并加入特定的方法操作以在数据录入及编辑过程中维持相互的关系^[5]。在这两个层次,公交站点和线路都可以采用以下两种方式进行构建:① 直接记录站点及线路轨迹的几何坐标;② 利用动态分段方法记录站点和线路相对于道路中心线的位置。两种记录方式可以相互转换。

1.2 公交几何网络

普通网络由节点和边两种基本要素构成,并带有一定的属性特征。根据公交层次的定义,可以分别在虚拟层和有向层构建公交网络(图 1)。

虚拟公交网络由虚拟站点和虚拟线路段构成,虚拟线路段一般是双向的;有向公交网络由有向站点和有向线路段构成,有向线路段是单向的。

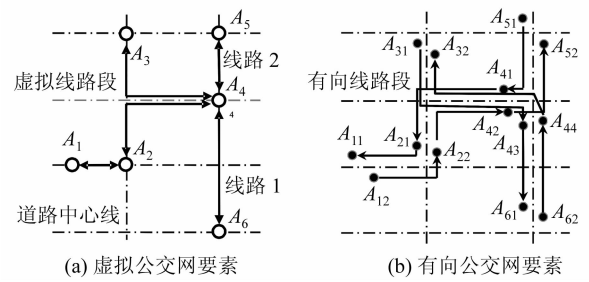


图 1 公交网络几何要素

Fig.1 Geometric Elements of Bus Network

虚拟线路段由虚拟站点连接,两个虚拟站点间存在惟一的虚拟线路段,但同一个虚拟站点联系的线路段可能在空间上存在部分重叠。同时,由于公交线路存在重叠现象,一条虚拟线路段可能有若干条公交线路经过。

有向线路段的情况更为复杂,首先是有向线路段及有向站点分布于道路两侧,其数量较大。如果某一站点存在多于两个有向站点分布,则有向线路段数量更多。不同线路运行时可能经过相同方向的路段,但并不一定停靠相同的有向站点。这样不仅线路段存在重叠情况,而且有向站点之间的空间关联也需要进行考虑。在生成有向公交网时,其空间上的重叠与关联关系需要进行细致的处理,以满足网络拓扑的要求。

1.3 有向层次网络中换乘的描述

在有向层次,为精确构建有向公交网络,需要将同名有向站点进行拓扑上的关联,这一关联通过步行线路段来实现。在公交换乘的过程中,出行者可能需要在同名的站牌点之间作步行移动,因此,可以将一个虚拟站点所包含的有向站牌点通过步行线路段联系起来,步行线路段是双向的,参与构建有向公交网络(图 2)。很明显,换乘步行线路段的加入增加了公交有向网络的复杂度。

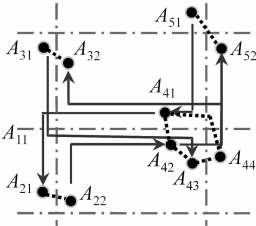


图 2 有向层次中的步行线路段

Fig.2 Walking Route Segments at the Directional Level

在条件许可时,步行路段的构建应客观准确

地反映地面的实际情况,如横跨街道时必须沿斑马线行走,在大型交叉口附近还可能存在着绕行现象等。从公交出行的时间分布来看,换乘时间是一个重要的方面。参照图 2,换乘时间包括两个部分,即等待时间和可能的在站牌点之间移动的时间。前者与公交车头时距有关,后者与步行距离和步行难度有关。因此,在构建有向公交网络时,需要对有向站点之间的步行线路段的阻力值进行适当的配置,以反映换乘中的实际状况。如果采用距离来运算,则公交有向网络中步行线路段的距离需要进行适当放大,形成与公交线路距离可比的尺度。

2 顾及换乘延误的公交出行最优路径计算方法

居民公交出行一般选择换乘次数少或出行时间短的路线^[6]。与此相对应,公交出行路径选择算法一般有两种模式:① 以出行时间为代价换取换乘次数最少;② 以换乘次数为代价换取空间上的距离最短^[7]。第一种模式寻求最少换乘次数,通过对公交数据集合进行不断地扩展、排序和求交,选择两点间换乘次数最少的路径。第二种模式是在已有的公交网络中以空间距离最短为目标搜索出最短路径,但没有考虑换乘因素。由于大城市公共交通网络空间分布比较密集,线路重复率高,换乘点情况复杂,单纯以两种模式求解都会产生一些奇异的特例,如最少换乘次数的出行路线可能产生不可接受的出行距离。

一般公交出行路径算法受数据模型的局限,不能处理换乘时步行和等待的延误。而基于多层次公交数据模型,这些延误因素可以在有向公交网络模型中得到客观的反映和处理。为此,采用一种两阶段循环的方法来求解带换乘的公交出行路径,即先用现有算法基于有向公交网络求解最优路径并获得换乘点,再将此换乘点处的延误加入网络重新搜索,直到满足给定的条件。这里的关键是换乘延误如何进行可比性折算,以反馈到有向公交网络中。换乘点的延误阻抗可以是时间延误,也可转换为距离进行表示。换乘延误由换乘距离及车头时距两个因素共同确定。

本算法以公交车行距离为基本单位,构建公交网络过程中需要将各种距离进行可比性换算,如步行距离与车行距离,等待时间与车行距离的统一。设 L_{bus} 表示有向公交线路段的长度, L_{walk} 为步行路段的长度, H_{bus} 为公交车头时距(平均等

待时间为车头时距的一半), V_{bus} 为公交运行的平均车速, V_{walk} 为步行速度, D_{bus} 为公交有向线路段可比距离, D_{wait} 为换乘等待可比距离, D_{walk} 为步行线路段可比距离(同站牌点换乘时值为0), D_{trans} 为综合换乘可比距离。则有:

$$D_{bus} = L_{bus}$$

(1)

$$D_{trans} = \begin{cases} D_{wait}, D_{walk} \leq D_{wait} \\ [1 + \text{int}(D_{walk}/D_{wait})]D_{wait}, \text{其他} \end{cases}$$

(2)

式中, $D_{wait} = V_{bus} (H_{bus}/2)$; $D_{walk} = L_{walk} (V_{bus}/V_{walk})$ 。

例如,大城市中公交车速 V_{bus} 取 15 km/h 的平均值,步行速度 V_{walk} 大约为 3 km/h,公交车头时距一般为 10 min,则 $D_{wait} = 1\ 250\text{ m}$;若取 L_{walk} 为 50 m,则 $D_{walk} = 250\text{ m}$ 。由于此时 $D_{walk} < D_{wait}$,在网络中需将换乘的阻抗值 D_{trans} 设为 1 250 m。

在公交路径优化过程中,先利用传统的算法基于有向公交线路网络计算最优路径,获得总出行距离 D_{trip} ,并寻求换乘点。如果存在换乘,则当前路径不一定最优,需在网络中引入新的换乘延误 D_{trans} ,重新求解最优路径。为确定优化计算的终止条件,设定综合参照距离 D_{ref} ,其值为 $D_{ref} = D_{trip} + D_{trans}$,即为某次出行的真实总出行距离。基本计算过程如下。

- 1) 用 D_{bus} 和 D_{walk} 对有向公交网络进行初始化处理,此时 D_{walk} 代表换乘延误。设定初始综合参照距离 D_{ref} 为 0,设定公交出行的起点和终点。
- 2) 基于有向公交网络求起终点间的最优路径,获得综合出行距离 D_{trip} 。
- 3) 在最优路径上搜索带步行线路段的换乘站点及同点换乘站点,获得换乘方案。同时,根据式(2)求解各换乘点的可比距离 D_{trans} ,并将其加入综合参照距离 D_{ref} 。
- 4) 将 D_{ref} 与前一次的 D_{ref} 进行比较,若 D_{ref} 不再增大,则说明已不能找到更为优化的综合最优

出行路径,退出运算,否则继续下一步。

5) 将各 D_{trans} 以转弯延误的方式加入有向网络中的换乘点,回到步骤 2) 重新求解。

3 基于武汉市的公交出行优化实例

3.1 武汉市常规公交数据库概况

用于公交出行优化的武汉市常规公交数据库包含了武汉市三镇构成的中心城区。数据库根据多层次公交模型构建,包含了语义层、虚拟层及有向层。数据采用手工直接坐标记录方式,空间上与基础道路相适应。在虚拟层及有向层都构建了公交网络,虚拟层由虚拟站点及虚拟线路段构成虚拟网络,有向层由有向站点、有向线路段及步行线路段共同构成有向线路网络。整个数据库采用 ESRI 公司的 Personal Geodatabase 进行构建,在 ArcGIS 环境中进行录入、编辑、显示以及网络优化求解。

3.2 公交优化计算实例

为清楚说明计算过程,选取一次公交出行进行分析,其起点为汉口火车东站(编号 A0572),终点为珞珈山站。按照本文提出的循环计算方法,经过三次计算与调整,获得优化结果。三次运算中有向公交网络的设置及调整分别为:

- 循环 1: $D_{bus} = L_{bus}$; $D_{walk} = 5 \times L_{walk}$;
- 循环 2:在两个非步行换乘点上分别加入换乘延误 1 250 m,其他不变;
- 循环 3:在一个步行换乘点上将步行可比距离置换为换乘延误 1 250 m,其他不变。

图 3 为前两个循环阶段获得的宏观最优路径及在起点处的细节,其中阶段 1 有两个换乘点,阶段 2 没有换乘点。阶段 3 没有在图中标出,其获得的宏观路径与阶段 1 是一致的,只是换乘点发生了变化。

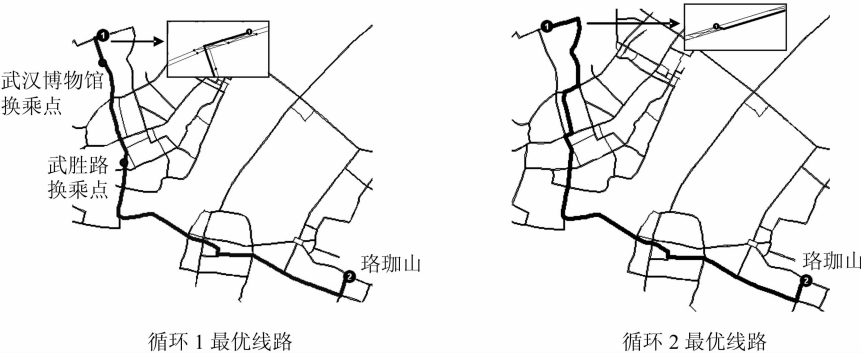


图 3 前两个循环阶段获得的最优线路及其换乘点

Fig. 3 The Optimal Routes and Transfer Points from the First Two Loops

三次计算的基本内容如表 1 所示。阶段 1 至少需要两次换乘,计算获得的综合出行距离为 17 563 m,由于存在两次换乘延误,综合参照距离应加上 1 250 m 的两倍,达到 20 063 m;第二次计算后的综合出行距离为 19 478 m,同时经过一次

53 m 的跨街道步行后,乘坐 519 路可直达终点,此时综合参照距离为 20 463 m;第三次计算的综合出行距离为 19 851 m,需要步行 211 m 的距离,一次换乘即可,此时综合参照距离为 20 046 m,小于前一阶段的综合参照距离,因此,循环过程可以终止。

表 1 一对站点间最优公交出行各循环阶段计算结果
Tab. 1 Result from the Looping Process of Bus Trip Optimization Between an O-D Pair

循环次数	站点总数	综合出行距离 D_{trip}/m	换乘序号	换乘点编号及名称	换乘路段及换乘方案	综合参照距离 D_{ref}/m
初始						0
1	19	17 563	1	A0591 武汉博物馆	A0581A0591→A0591A0601 4110/5091→100	20 063
			2	A0763 武胜路	A0174A0763→A0763C0013 100→5190	
2	23	19 478	1	A0572 汉口火车站东站	横穿道路步行 53 m→5190	20 463
3	19	19 851	1	A0573 汉口火车站西站步行	211 m→100	20 046(已 无新的换乘点)
			2	A0763 武胜路	A0174A0763→A0763C0013 100→5190	

3.3 结果分析与评价

在确定公交运行平均车速、车头时距、出行者平均旅行时间等指标的情况下,通过调整有向公交网络中的相关要素阻抗数值,可以获得接近优化的换乘方案。通过分析原始数据,在阶段 3 之后,所有可以调整的可比距离都已完成调整,因此在现有的算法下,阶段 3 所获得的路径即为最后的最优结果,不再有其他优化线路。表 1 中,阶段 2 和阶段 3 得到的换乘方案都是可以接受的,阶段 2 先步行一定的距离,上车后无需换乘可直达目的地,这与基于最少换乘的算法结果一致;阶段 3 也需先步行一定距离,再换乘一次即可,与基于最短距离的算法结果一致。因此,该方法同时兼备基于最少换乘和最短距离的优点。应该说,阶段 2 和阶段 3 的结果是十分接近的,其结果可以满足公交出行者的不同选择原则,即不愿换乘的可以采用直达但多走一定的距离,愿换乘的可以以最少的换乘来节省时间。

表 1 所给出的换乘方案其实只是多种换乘方案之中的关键部分,其他还存在相似的换乘方案,如 100 路与 5190 路有好几个重复线路段,在这些线路段上的任何有向站点均可实现换乘。这些候选换乘点可以在换乘指南中一一指出。为简化问题,本文的计算过程中只考虑了第一个换乘点的情况。从理论上分析,由于公交有向线路的复杂性,考虑其他换乘点也可能会带来不同的结果。

该公交出行优化模型的特点是在已有公交网络数据库的基础上,以空间距离最短为目标得到

最优路径,再计算可行的换乘方案,最后选择出换乘次数最少且综合距离最短的最优出行路径。与单独基于最少换乘次数或最小出行距离的算法相比,该方法的效率较低,但结果更具有综合性,更能体现出行者的综合性权衡思维。该方法不仅计算了最终的可比出行距离,而且可以给出详细的换乘方案指南。这种详细指南有图形和文字两种方式,具体指明换乘时有向站牌点的选择,以及步行移动的方向。而这些详细信息在复杂的城市环境中,更是出行者需要获得的内容。此外,由于有良好的多层次公交数据库支撑,该方法的扩展性较强,通过将距离阻抗值用时间、舒适度等取代,可以换算为其他方面的费用。

建立在有向层次基础上的公交数据模型可以实现公交换乘距离的精确求解。在最优路径算法中,通过考虑站牌点之间的步行延误和等待延误,获得综合性的公交换乘延误。将换乘延误反馈到有向公交网络中,可进一步搜索更为合理的换乘方案。这种循环反馈的公交最优路径计算方法兼有单纯基于最少换乘和基于最短距离两种策略的优点,各阶段所获得的换乘方案都具备可操作性,可提供更丰富的公交换乘候选方案。由于公交系统的复杂性,在一些细节上还可以进行更深入的探讨,如结合各条公交线路的具体运行计划,换乘求解可以继续深化,如车头时距变化、到达概率分布、基于时间表的计算、舒适度评价等;结合微观道路交通设施如红绿灯与斑马线的布局,步行路段上的延误计算也可以更加完善。

参 考 文 献

[1] Peng Zhongren,Huang Ruihong. Design and Development of Interactive Trip Planning for Web-based Transit Information Systems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2000, 8 (1-6): 409-425

[2] 李曙光,苏彦民. 基于 GIS 的城市公交路网最优路线算法研究[J]. 中国公路学报, 2003,16 (3):83-86

[3] Huang Zhengdong. Data Integration for Urban Transport Planning[D]. The Netherlands: Utrecht University-ITC, 2003

[4] 黄正东,于卓,汪斌. 一种面向对象的多层次公交数据模型及其应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007,32(4): 22-25

[5] 李云,黄正东. 基于 UML 构建多层次公交站点模型[J]. 交通与计算机,2006, 24(6): 13-17

[6] 杨新苗,王伟,马文腾. 基于 GIS 的公交乘客出行路径选择模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(6): 87-91

[7] 翁敏,毋河海,杜清运,等. 基于公交网络模型的最优出行路径选择的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(6): 500-503

第一作者简介:黄正东,博士,教授,现主要从事城市信息系统、GIS-T、交通规划等方面的研究。
E-mail:huangitc@126.com

Urban Bus Trip Optimization Based on Transit Data
Model at Directional Level

HUANG Zhengdong^{1,2} LI Dan³ ZHOU Yuhong¹

(1 School of Urban Design, Wuhan University, 8 South Donghu Road, Wuhan 430072, China)

(2 Transport Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Anhui Agricultural University, 130 West Changjiang Road, Hefei 230036, China)

Abstract: Bus transit transfer is a key problem in both transit assignment and transit trip planning. Conventionally the transfer is estimated with average waiting time, which prevents precise acquisition of the optimal route of a particular trip. Based on spatial data, transit features can be represented at different levels of detail. The data model at the detailed directional level provides possibility for precisely evaluating transfer impedance.

Key words: transit hierarchical data model; bus transfer distance; optimal route algorithm

About the first author: HUANG Zhengdong, Ph.D, professor, He majors in urban information systems, GIS-T and transport planning.
E-mail: huangitc@126.com

本刊 2007 年出版基本情况统计

2007 年度,《武汉大学学报·信息科学版》共出版 12 期,合计字数 245 万,比上年增加 6.5%;发表论文 275 篇,比上年减少 4 篇;篇均页码 4.18,增加 0.2 面。同期,共收到国内外投稿 798 篇,与上年基本一致;用稿率 34.5%,较上年下降 1.3 个百分点。发表的论文,从投稿到出版,时差最长 119 天,最短 36 天,平均 70.2 天,比上年缩短 11.2 天。发表的论文中,校内稿件 139 篇,占 50.5%;校外及海外稿件 136 篇,占 49.5%;外稿比例较上年下降 1.4 个百分点。各类基金资助论文 259 篇,基金产文率 94.2%,比上年提高 2.4 个百分点。EI 核心版收录 275 篇,收录比例继续保持 100%。

已发表论文中,涉及作者 805 人次,比上年减少 7.3%。其中校内作者 401 人次,占 49.8%;校外及海外作者 404 人次,占 50.2%;校外及海外作者减少 0.8 个百分点。按第一作者统计,院士论文 14 篇,占 5.1%;博士生导师 69 篇,占 25.1%;教授、研究员 10 篇,占 3.6%;副教授 35 篇,占 12.7%;博士和博士生 128 篇,占 46.6%;其他 19 篇,占 6.9%。累计高级职称作者论文比例 46.5%,博士论文比例 46.6%,两者合计 93.1%,比上年提高 3.5 个百分点。

本年度内,有 2 篇论文入选第一届中国百篇最具影响优秀国内论文(详见本刊 2008 年第 1 期相关报道);影响因子 0.747,引用频次 1 312,比上年有明显提高(见《中国期刊引证报告》)。