

基于边介数的大城市公交网络优化模型

田庆飞, 赵淑芝, 曹 阳

(吉林大学 交通学院, 130022 长春)

摘 要: 为解决大城市公交网络优化设计问题, 提出一种考虑交通拥堵的网络优化模型. 首先分析最短路径策略在大城市应用的弊端和造成交通拥堵的原因, 在研究复杂网络理论的基础上, 基于边介数提出绕行策略. 通过扩展边介数, 定义有效边介数和有效路径, 提出基于边介数的大城市公交网络优化模型, 并设计了实现算法. 以长春市路网为例, 求解 β . 结果表明, 随着 β 的变化, 平均出行距离先减小后增大, 在 $\beta = 0$ 时最短; 平均出行速度先基本稳定后急剧增大. $\beta = 0.1$ 时, 居民平均出行时间最短, 网络效率最高, 这时优化模型可快速减少由于交通拥挤造成的网络效率损失.

关键词: 公交网络优化; 边介数; 复杂网络理论; 大城市公交; 网络效率

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0144-05

Metropolis transit network optimization model based on edge betweenness

TIAN Qing-fei, ZHAO Shu-zhi, CAO Yang

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

Abstract: In order to solve the optimal design problem of metropolitan bus transit network, a network optimization model was proposed, which had considered the urban traffic congestion. Firstly it analyzed the malpractices of the shortest path strategy in large cities and reasons of traffic jam. It studied complex network theory and proposed the bypass strategy based on edge betweenness. Through extending the edge betweenness, it defined effectivity edge betweenness and effectivity path. Then it proposed metropolis transit network optimization model based on edge betweenness and designed its algorithm. Take the street network of Changchun City for example to solve. The results show that with the changes of β , the average trip distance first decreases and then increases. When $\beta = 0$, it is shortest. The average travel speed first is basically stable and then increases sharply. When $\beta = 1$ the residents average travel time is shortest and the network efficiency is highest. At this time optimization model can rapid decrease the losses of network efficiency caused by traffic congestion.

Key words: transit network optimization; edge betweenness; complex network theory; metropolis transit; network efficiency

大城市交通拥堵问题是目前研究的热点, 它对居民出行影响越来越大. 从北京、广州等大城市的交通现状看, 无法在短期内得到有效解决. 很多国内外专家就拥堵问题对复杂网络理论进行了研究^[1-2], 它是研究复杂网络的有力工具. 吴建军等对城市交通系统的复杂性进行了研究, 提出缓解交通拥堵的策略和运输网络级联失效的预防策

略^[3]; Motter 等引入介数定义节点的负荷, 提出一种级联失效模型^[4]; Yan G 等为控制通信网络中的信息堵塞和改善网络信息传递效率, 提出基于节点度的广义路由算法^[5]; Wang W X 等提出集成动态静态信息的混合路由算法^[6]和基于本地信息的路由策略^[7]; 这些算法和策略是在通信网络特征基础上提出和论证的, 是为研究方便, 假设所有节点(路由器)数据处理能力相同, 边权都为 1, 最短路为边数最少的路径, 显然这与交通网络特征不符.

因此, 本文结合公交网络优化设计的实际, 在

收稿日期: 2011-12-28.

作者简介: 田庆飞(1986—), 男, 博士研究生;

赵淑芝(1958—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 田庆飞, tqf415@163.com.

分析居民出行策略的基础上,应用复杂网络理论,提出基于边介数的大城市公交网络优化模型及其实现算法.它同时考虑了不同的路段权重和节点处理能力,并对协调参数 β 最优值进行了深入分析和求解.

1 居民出行策略分析

在日常出行中,居民一般以最短路策略选择路径到达目的地.中小城市最短路策略是有效的,在大城市出行需求量较大,集中在最短路会造成交通拥堵严重,使最短路出行时间变长,成为非最短路或无法通行的路径.居民的这种出行策略是目前大城市交通拥堵的主要原因之一.

对于选择小汽车、出租车等方式出行的居民,可根据经验和当时的情况,重新选择出行路径,绕过交通拥堵点,这样虽然相对最短路绕远了,但是缩短了由于交通拥堵损失的时间.城市公交车是按照固定站点、固定线路和固定时刻表为居民提供服务的交通方式,在发生交通拥堵时,无法重新选择路径,只能在公交网络优化设计时,融合绕行策略,绕过交通拥堵点,实现重新选择路径的目的.

绕行策略是在公交网络优化设计时,使公交车能适时绕过这样的拥堵节点,使居民公交出行时间变短,线路准点率提高.它是以牺牲一部分公交网络效率为代价换取居民公交出行成本的降低.

2 拓展边介数

为使公交网络优化设计时实现绕行策略,应用复杂网络理论中的边介数识别交通拥堵.边介数为网络中所有经过该边的最短路径数量与最短路径总数之比^[8].为适应公交网络特征,引入参数 β ,将边介数进行拓展.

定义 1 有效边介数定义为对于给定的参数 β ,网络中所有经过该路段的最短路径数量与最短路径总数之比.记作 $B^\beta(i)$,则

$$B^\beta(i) = \sum_{j,k \in V \mid j \neq k} \frac{n_{jk}^\beta(i)}{n_{jk}^\beta}.$$

其中: $B^\beta(i)$ 为路段 i 的有效边介数, n_{jk} 为节点 (j, k) 之间最短路径的数量, $n_{jk}^\beta(i)$ 为节点 (j, k) 之间最短路径中经过路段 i 的数量, β 为协调参数, V 为网络中全部节点的集合.

定义 2 规定 $L(p(s \rightarrow t); \beta)$ 为对于给定参数 β ,节点 (s, t) 之间路径的长度,则节点 (s, t) 之间的有效路径是使 $L(p(s \rightarrow t); \beta)$ 值最小的路径.其中 $L(p(s \rightarrow t); \beta) = \sum_{i=1}^N B^\beta(i)r(i)$, N 为路

径 $p(s \rightarrow t)$ 包含的路段总数, $r(i)$ 为路段 i 的阻抗, s .显然搜索有效路径时,路段 i 的有效权重为 $B^\beta(i)r(i)$,它是在有效边介数的基础上建立的,在有效路径上布设的公交线路就是有效线路,有效线路形成的公交网络就是有效网络.

根据复杂网络理论和有效路径的定义,协调参数 β 在这里表征有效路径偏离拥堵节点的程度.当 $\beta = 0$ 时,有效路径为网络最短路,即居民出行为最短路策略;当 $\beta > 0$ 时,有效路径开始偏离拥堵节点,部分居民出行时采取绕行策略;当 $\beta < 0$ 时,有效路径更倾向于经过枢纽节点,即居民出行易先到枢纽站点换乘.由此可知,参数 β 变化过程模拟了居民出行策略的变化,当 $\beta > 0$ 时,有效路径体现了居民出行应用绕行策略的情况,参数的大小体现了居民出行绕行的程度,最优参数值求解详见下文.

3 基于边介数的公交网络优化模型

为均衡网络效率和居民出行时间,在搜索有效路径的基础上,应保证公交网络运输效率最大化,因此,目标函数为两个:1) $L(p(s \rightarrow t); \beta)$ 值最小化;2) 公交网络运输效率最大化.

$L(p(s \rightarrow t); \beta)$ 最小时的有效路径在 $\beta > 0$ 时模拟了居民出行时采用绕行策略的情况,应用绕行策略优化的目的就是使所有公交乘客出行时间缩短.目标函数表达式为

$$\min L(p(s \rightarrow t); \beta) = \sum_{i=1}^N B^\beta(i)r(i).$$

绕行策略使公交车运行过程中,会绕过介数较大的节点,它们一般都是相对重要的节点或枢纽站点,若过多乘客绕过,必然会使公交网络运输效率低下.为使公交网络运输效率最大化,设计目标函数表达式为

$$\max Z = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij}}{r_{ij}}.$$

其中: Z 为公交网络运输效率,人次/s; x_{ij} 为线路 i 上路段 j 的公交客流量,人次; r_{ij} 为线路 i 上路段 j 的阻抗, s .

单条线路的约束条件包括线路长度,路线非直线系数,路线客运能力,复线条数等.整个线网的约束条件包括线网密度,乘客换乘系数,站点覆盖率,线网覆盖率等.它们的计算可参考文献[9-10],从而建立公交网络优化模型.

4 优化模型算法实现

建立的公交网络优化模型为双目标规划模

型,大城市公交网络比较复杂,采用解析法求最优解计算量较大,有些模型可能不存在唯一的最优解.因此,本文提出一种操作性较强的算法,计算过程较为直观,可控性较强.

4.1 搜索备选线路集

计算路网中各个路段的有效权重,基于绕行策略,应用带约束条件的 k 最短路算法搜索备选线路集,其算法如下:1) 取一起终点对 (s,t) ,应用 Dijkstra 法搜索它们之间的最短路径 sp_1 ,检验 sp_1 是否满足线路长度约束,若满足则将 sp_1 作为备选线路,并取下一起终点对进行搜索备选线路,否则转入下一步,其中 sp_k 表示 k 最短路径.2) 当确定 sp_{k-1} 时搜索 sp_k ,对 V_s 中的点进行标号和更新,取一点 h ,它的标号值为 $P_h = \min_{m=1,2,\cdots,k-1} (\min_{i \in V, j \in V_m} (L_i + L_{ij} + S_m - L_j))$,则 $S_k = \min_{h \in V_s} P_h$ 并确定 sp_k .若 $P_h = S_k$ 且 sp_k 过点 h ,则更新 h 的标号,更新公式与标号公式相同;若该点已没有邻接点,则标号更新为无穷大.其中 V_m 为 m 最短路经过的点集合, $V_s = \bigcup_{m=1}^{k-1} V_m$, V 为最短路邻接点集合, L_i 为节点 i 到起点 s 的最短距离, L_{ij} 为邻接点 i,j 之间的距离, S_m 为 m 最短路径的长度.3) 检验 sp_k 是否满足线路长度约束,若满足则将其作为备选线路;否则返回步骤 2.4) 检查是否是最后一对起终点,若是则得到备选线路集合 SP ,否则返回步骤 1.

这样基于绕行策略得到备选线路集合 SP ,根据参数 β 取值,部分路径可绕过交通拥堵点,因此备选线路集合中的线路都是有效线路.

4.2 有效线路布设

根据目标函数,采用效率最大化原则布设有效线路.分别计算备选线路的运输效率,将运输效率最高的备选线路布设在路网中,然后对客流 OD 矩阵进行更新,其算法思路为:计算线路各个断面的断面流量、各个站点流量以及站点容量^[11].1 个站点可能同时被多条线路共用,此时,站点流量为经过该站点的各个断面流量之和.检验各个站点流量和站点容量,若各个站点流量均小于站点容量则经过该线路的 OD 量能全部被运送;若站点流量大于站点容量,则布设的线路只能运送部分客流 OD 量,具体分为 3 步.

第 1 步:确定超载站点集合.选取超载站点遵循就近原则,即线路断面的超载流量向公交行驶逆方向的站点就近分配,分配流量与各站点的上客量相等(或小于最后一站点上客量),分配到超载客流的站点就是超载站点.

$$\Delta S_l = Y_l + X_l - S.$$

其中: ΔS_l 为超载站点 l 上的超载流量,人次/h; Y_l 为超载站点 l 上的背景流量,人次/h; X_l 为超载站点 l 上新增流量,人次/h.

$$\delta_{ij}^l = \begin{cases} 1, & ij \text{ 经站点 } l; \\ 0, & ij \text{ 未经站点 } l. \end{cases}$$

存在实数 m 满足

$$\begin{cases} \sum_{p=1}^{m-1} G_{l-p}^l - \Delta S < 0, \\ \sum_{p=1}^m G_{l-p}^l - \Delta S \geq 0. \end{cases}$$

其中: G_k^l 为站点 k 对超载站点 l 贡献的流量; q_{ij}^k 为从站点 k 上车的 OD 量; $(l-p)$ 表示 l 减去 p ,其他类似符号同理.

则站点 l 后的 $(m-1)$ 个站点上车经过站点 l 的 OD 全部留剩,站点 $(l-m)$ 上车经过站点 l 的 OD 部分留剩.站点 l 后 m 个站点进入超载站点集合 V_s .

第 2 步:确定站点 $(l-m)$ 的 OD 更新量.在同一站点 $(l-m)$ 的乘客,具有同等上车的权利,同时具有同等留剩的机会.所以站点 $(l-m)$ 的 OD 更新量计算公式为

$$Q_{ij}^{l-m} = (\Delta S - \sum_{p=1}^{m-1} G_{l-p}^l) \frac{G_{l-m}^l}{\sum G_{l-m}^l}.$$

其中: Q_{ij}^{l-m} 为从站点 $(l-m)$ 上车,为超载站点 l 贡献的客流量.

第 3 步:某些站点可能是多个超载站点的贡献者,取站点 OD 更新量时,为保证全部站点均不超载,每一 OD 留剩量取它在线路上各站点留剩量的最大值,即 OD 矩阵 $[i,j]$ 更新值为

$$Q_{ij} = \max_{(l-m) \in V_s} (Q_{ij}^{l-m}).$$

OD 矩阵更新完毕,重新搜索备选线路和布设有效线路,直到所有的起始点对都布设一条有效线路,再进行逐步的调整优化,得到满足线路约束的有效网络.

5 确定最优参数 β

5.1 参数分析

根据前面的分析可知,参数 β 与居民出行时间之间的函数关系曲线应为先下降再上升.当发生交通拥堵时,部分居民采取绕行策略,偏离枢纽节点可绕过交通拥堵点,这时可缩短居民出行时间;随着参数 β 的逐渐增大,居民出行路径逐渐偏离拥堵点,离交通拥堵点越来越远,居民出行时间

就越越来越短;当参数 β 达到一个临界值 β_c 时,居民出行路径偏离交通拥堵点缩短的时间与居民绕远增加的时间相等.当参数 β 继续变大时,居民总的出行时间开始逐渐增加.

显然,参数 β 的最优值与实际网络和城市交通拥堵程度有关,交通拥堵越严重,临界值 β_c 越大.通过分析不同 β 可观察绕行策略下居民的出行轨迹,从而验证该策略在大城市公交网络优化设计中的合理性.

5.2 参数求解

长春市交通拥堵严重,其中主干道人民大街、南湖大路、自由大路、亚泰大街、解放大路、吉林大路等“堵点”较多,其他市区支路交叉口拥堵也较为严重.以长春市道路网作为基础网络求解参数 β 的最优值.将长春市划分为 163 个交通小区,应用 TransCAD 搜索并记录它们之间的有效路径,经过分析计算可得到各个网络指标值.

根据反复计算的结果,参数 β 与拥挤网络效率 E_1 、平均出行时间 T 的变化趋势见图 1.从图中可以看出,当居民平均出行时间最短,网络效率最高时, β 的最优值为 0.1. $\beta > 0$ 时, T 的变化趋势与参数分析中的结论一致; $\beta < 0$ 时,有效路径倾向于经过枢纽站点,由于枢纽站点处理能力较高, T 增长较慢. T 越短, E_1 越高,这与图中趋势一致.

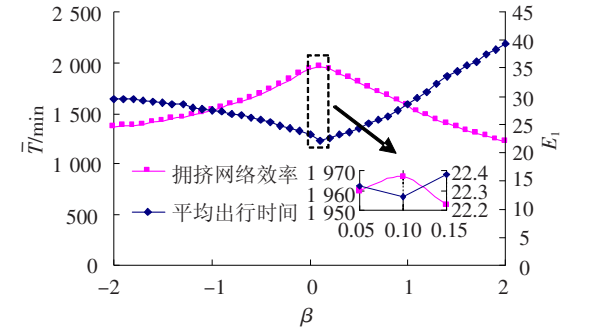


图 1 不同 β 与 E_1 、 T 的变化趋势图

参数 β 与居民平均出行距离 $\bar{L}$ 和平均出行速度 $\bar{v}$ 的变化趋势见图 2.从图中可看出, $\beta > 0$ 时,绕行策略使交通拥堵对出行影响变小, $\bar{v}$ 开始突增至 1 个值,然后逐渐增加,同时绕行使 $\bar{L}$ 快速增加; $\beta < 0$ 时,有效路径倾向于经过枢纽站点,必然加重交通拥堵,速度有所下降.随着 β 变化, $\bar{L}$ 和 $\bar{v}$ 的变化趋势验证了对 β 的分析.

参数 β 与零流网络效率 E_0 、拥挤网络效率 E_1 以及由于拥挤造成的效率损失 ΔE 的变化趋势见图 3.从图中可以看出,由于交通拥挤,存在网络效率损失.相对于 E_0 、 E_1 的峰值右移, β 值由 0 变化增长至 0.1.在 $\beta = 0.1$ 时,损失值急剧减少,这种相变现象是由于绕过交通拥堵产生的积极影

响.当 β 继续增大时,出行路径逐渐绕到负荷较低的路段,交通拥堵影响较小,效率损失也逐渐降低. $\beta < 0$ 时,由于枢纽节点发生拥堵,网络效率损失保持较大的数值.

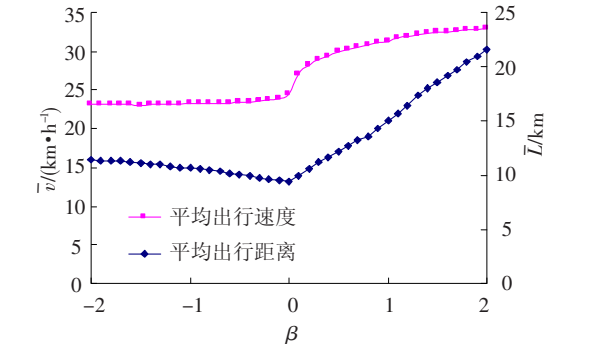


图 2 不同 β 与 $\bar{L}$ 、 $\bar{v}$ 的变化趋势图

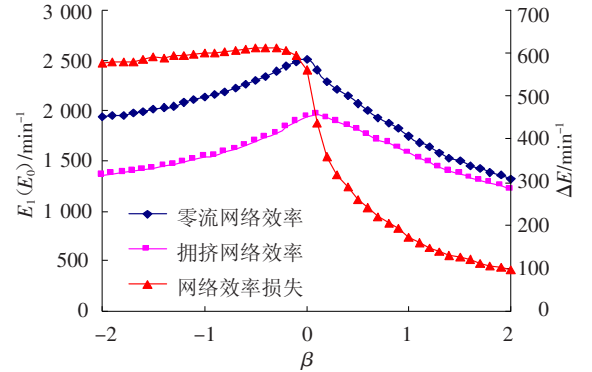


图 3 不同 β 与 E_0 、 E_1 、 ΔE 的变化趋势图

6 结 论

1) 根据绕行策略优化城市公交网络,既可充分利用枢纽站的高效处理能力,又可使公交出行适时避开交通拥堵,缩短出行时间,因此可适合在大城市或存在交通拥堵的城市应用.

2) 基于边介数优化的大城市公交网络可使部分乘客出行时避开交通拥堵点,这将增强网络对蓄意攻击的抵抗能力,改善网络的鲁棒性.

3) 双重策略提高公交网络的可靠性.绕行策略是将公交车作为机动车一种,考虑整个交通系统的拥堵对公交系统的影响;站点容量模型考虑了由于线路运输能力限制产生的拥堵对公交系统的影响.

4) 以长春市路网为基础求解 β 最优值,结果表明,最小化网络平均出行时间、最大化网络效率可确定 β 的最优值.

参考文献:

[1] 汪小帆,李翔,陈荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
[2] PORTA S, CRUCITI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: a dual approach[J]. Environment

- and Planning B; Planning and Design, 2006, 33(5): 705 – 725.
- [3] 吴建军, 高自友, 孙会君, 等. 城市交通系统复杂性: 复杂网络方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66: 65102.
- [5] YAN G, ZHOU B, HU B, *et al.* Efficient routing on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2006, 73: 46108.
- [6] WANG W X, YIN C Y, YAN G, *et al.* Integrating local static and dynamic information for routing traffic[J]. *Physical Review E*, 2006, 74: 16101.
- [7] WANG W X, WANG B H, YIN C Y, *et al.* Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network[J]. *Physical Review E*, 2006, 73: 26111.
- [8] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, *et al.* Complex networks: structure and dynamics[J]. *Physics Reports*, 2006, 424: 175 – 308.
- [9] 王伟, 杨新苗, 陈学武. 城市公共交通系统规划方法与管理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] 胡启洲, 邓卫. 城市常规公共交通系统的优化模型与评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 赵淑芝, 田庆飞, 曹阳. 基于站点容量限制的公交效率网络设计模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(增刊1): 81 – 84.

(编辑 魏希柱)

(上接第 92 页)

4 结 论

1) 提出了调峰炉热力站优化调度方法, 通过优化调度, 可实现热负荷的最优配置, 达到节能目的.

2) 建立了调峰炉热力站优化调度模型, 该模型结合了能耗最小模型和费用最小模型, 以实现综合节能最优为目标.

3) 给出免疫粒子算法, 将免疫思想应用到粒子群算法中, 使算法有较好的实时性, 且改进了粒子群算法的早熟性, 易陷入局部极值等缺点.

4) 该调度方法可实现节能的目的, 通过实例进行验证, 综合能耗降低了 11.31%.

参考文献:

- [1] 江亿. 我国供热节能中的问题和解决途径[J]. 暖通空调, 2006(3): 37 – 41.
- [2] SONNTAG C, SU W, STURBERG O. Optimized start-up control of an industrial-scale evaporation system with hybrid dynamics[J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(8): 976 – 990.
- [3] 吕泽华, 赵士杭, 陈钢. 抚顺石化热电厂热电联供系统的优化调度[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(10): 36 – 40.
- [4] 许红胜, 杨莹莹, 葛斌. 蒸汽供热管网的优化方法研究和软件开发[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 6(5): 55 – 59.
- [5] CAI Jiejin, MA Xiaoqian, LI Lixiang, *et al.* Chaotic ant swarm optimization to economic dispatch[J]. *Electric Power Systems Research*, 2007, 77(10): 1373 – 1380.
- [6] WANG L, SINGH C. Stochastic economic emission load dispatch through a modified particle swarm optimization algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(8): 1466 – 1476.
- [7] 黄少荣. 粒子群优化算法综述[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8): 1977 – 1978.
- [8] 段富, 苏同芬. 免疫粒子群算法的改进及应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(7): 1883 – 1888.
- [9] 莫愿斌. 粒子群优化算法的扩展与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 12 – 23.
- [10] 张捍东, 方玲, 岑豫皖. 三种混合粒子群算法比较[J]. 自动化与仪表, 2011(7): 10 – 13.

(编辑 魏希柱)