

基于删边扩容策略的城市交通网络优化^①

陈乐瑞¹, 潘秋萍¹, 孔金生²

¹(郑州铁路职业技术学院 电气工程系, 郑州 450052)

²(郑州大学 电气工程学院, 郑州 450000)

摘要: 建立一个面向控制的城市交通网络模型, 以结构矩阵的形式进行数学表示, 引入序参量的概念来表征城市交通的拥堵状况, 并提出了基于介数的具体删边扩容策略. 将此策略应用到已建立的交通网络模型中进行仿真验证, 证明了该策略在不影响行驶路径长度的前提下可以显著改善城市交通状况, 并得出了删边比例与介数最大值成反比例的对应关系的结论.

关键词: 交通网络模型; 删边扩容; 序参量; 介数

Enhancing the Transmission Efficiency by Edge Deletion in the Urban Traffic Optimization

CHEN Le-Rui¹, PAN Qiu-Ping¹, KONG Jin-Sheng²

¹(Department of Electrical, Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou 450000, China)

²(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: This paper establishes an urban traffic network model which is used with control methods, and is mathematical described by Structure matrix. The concept of order parameter is introduced to characterize the urban traffic congestion. Then this paper put forward a certain strategy of enhancing the transmission efficiency by edge deletion which is based on betweenness. This strategy is applied in the traffic network model which has been established. The simulation results show that, in the optimization of urban traffic, enhancing the transmission efficiency by edge deletion is an effective and low cost strategy. And a conclusion is drew that the corresponding relationship of edge deletion proportion and maximum betweenness is inversely proportional.

Key words: urban traffic network model; edge deletion; order parameter; betweenness

随着社会经济和城市现代化的快速发展, 人均汽车保有量逐年攀升, 使得日益拥挤的城市交通和不断增长的交通需求成为了难以调和的矛盾. 在此背景下, 智能交通系统(Intelligence Traffic System, ITS)应运而生, 并成为世界各国的热点研究问题. ITS 将先进的数据通讯传输技术、信息技术、电子控制技术以及计算机处理技术等先进技术有效地综合运用于整个运输管理体系而建立起的一种在大范围内、全方位发挥作用的, 实时、准确、高效的综合运输管理系统^[1]. 以往 ITS 在解决交通拥堵方面, 主要以提高交叉口通行能力, 优化路由路径策略以及提高道路负载能力等方法为主, 目的是提高交通运行效率以及扩大交通容量. 比如通

过一定的控制算法改变红绿灯信号配时, 进而控制城市路网的交通状态就被证明是一种行之有效的方法, 此类方法的典型应用是 SCOOTs 和 SCATS^{[2][3]}. 但是随着路网规模的扩大, 尤其是在解决大规模城市交通网络的拥堵问题时, 这类增量式的方案引发了建设成本与性能效果之间难以调和的矛盾.

删边扩容是一种通过删去或者避开网络中部分连边, 使流量分散, 从而达到缓解拥塞, 提升网络容量效果, 以城市交通网络为例, 在交通流量高峰时刻, 可以关闭交叉路口一条或者多变(引道), 会使部分车流自动绕开该引道, 从而降低路口拥塞, 保证道路顺畅. 对于像交通网络这种小世界网络, 它的度分布是

① 收稿时间:2015-12-07;收到修改稿时间:2016-01-07 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005264]

非常均匀的,但是少数节点有很大介数,而绝大部分节点介数很小,即反映负载特征的介数分布不均匀,而反映连接特征的度分布很均匀,这种差异性会导致删边扩容效应.基于此本文建立了一个面向控制的城
市交通网络模型,提出了具体的删边扩容方法,并在此模型上验证删边扩容的有效性.仿真实验表明了删边扩容在城市交通优化中的有效性和可行性.

1 城市交通网络模型

为了更好的体现删边扩容的效果,本文基于随机网络的理论建立城市区域交通网络模型.该模型里节点的分布方式遵循钟形的泊松分布,有一个特征性的“平均数”.连接数目比平均数高许多或低许多的节点都极少,随着连接数的增大,其概率呈指数式迅速递减^[4].

1.1 城市交通网络模型的分析与建立

一个城市的交通网络可以看成是由大量路段和路口相连构成的随机网络,一般的连接数为 4(即十字路口).在此网络结构下,路网中的交通流在路口交通信号灯的控制下进行运动,经最短路径到达目的地.

如图 1 所示,交通网络基本单元包括路网中的一个路口以及流入此路口的所有路段.该基本单元在交通网络中的位置由路口横坐标 m ,纵坐标 n 来表示,记为 $G(m,n)$.其余与网络单元路口 $G(m,n)$ 相邻的路口也用其相对应的坐标表示,如图 1 虚线所示.在此基本单元中,连接路口 $G(m,n)$ 的路段由它们所在的方向来表示,即东路段(E)、西路段(W)、南路段(S)和北路段(N).

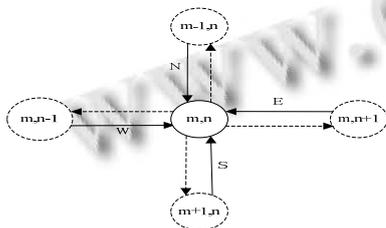


图 1 城市交通网络基本单元

大多数城市交通网络都为网格形状,那么基于随机网络的理论城市区域交通网络模型就可以用一个网络拓扑图来表示,如图 2 所示.

此拓扑图中,有几种典型的基本单元形式,“标准”(Standard)代表连接四个路段的十字路口;“T-

型”(T-shape)代表连接三个路段的丁字路口;“源”(Source)代表车辆进入或离开交通网络的地方;“空”(Absence)代表此位置无网络单元.其中“源”和“空”并不是真实存在的单元,而是为了建立建模的需要构造的假设单元.表 1 是对交通网络基本的比较说明.

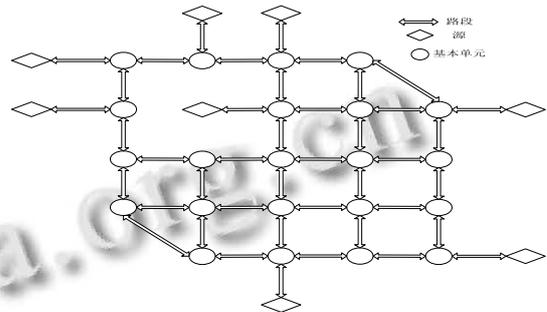


图 2 城市交通网络

表 1 网络元素的标记与比较

单元类型	标记	缺失路段	单元类型	标记	缺失路段
Standard	+	无	Absence	0	E,W,S,N
East	<	E	East	S_E	N,E,S
T-shape			Source		
West	>	W	West	S_W	W,N,S
T-shape			Source		
South	Δ	S	South	S_S	W,E,S
T-shape			Source		
North	∇	N	North	S_N	W,N,E
T-shape			Source		

因此,图 2 所示的城市区域交通网络拓扑结构可由一个结构矩阵来表示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_N & S_N & 0 & 0 & 0 \\ S_W & \nabla & \Delta & < & \nabla & 0 & 0 \\ S_W & < & S_W & + & + & \nabla & S_E \\ 0 & > & \nabla & + & + & < & 0 \\ 0 & > & + & + & + & < & 0 \\ 0 & 0 & \Delta & + & \Delta & \Delta & S_E \\ 0 & 0 & 0 & S_S & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.2 城市交通网络模型相关参数的分析

向交通网络中输入的车流率为 $R(\text{veh}/\text{min})$,车辆的源节点和目的地均为随机选择.假定每个路口 $G(m,n)$ 向它所连接的各个路段的通行能力均为 $C(g)$,即每个时间步路口 $G(m,n)$ 向它所连接的各个路段放行

$C(g)$ 辆车. 新产生或抵达的车辆大于 $C(g)$ 时, 未能及时放行的车辆就在路段中等候, 按照先进先出的原则处理. 抵达目的地的车辆从网络中删除.

当网络中产生的车流率 R 逐渐增加时, 城市交通会从非拥塞状态变为拥塞状态, 我们定义这个临界车流量产生速率 R_C 为交通网络的吞吐能力, 即网络容量.

$$R_C = \min \frac{C(i)N(N-1)}{g_{\max}} \quad (1)$$

在节点能力一样, 常数 $C(i)$ 为定值, 由此可以看出一个网络的容量取决于所有节点介数的最大值. 只要车流量的产生速率不超过 R_C , 在绿灯相位下车辆可自由通过道路口, 且无滞留车辆. 为了分析从非拥塞状态到拥塞状态的变化, 我们引入了序参量(order parameter)的概念^[5]:

$$\mu(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle \Delta W \rangle}{R \Delta t} \quad (2)$$

其中 $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, 表示从时刻 t 到 $t + \Delta t$ 交通网络中累积的车辆数, $W(t)$ 是时刻 t 交通网络中存在的车辆数, $\langle \Delta W \rangle$ 表示对时间窗口 Δt 对应的 ΔW 求平均. 因此, 序参量 $\mu(R)$ 表示了车辆产生速率 R 下交通网络中累积的车辆数与产生的车辆数的比率. 当 $R \leq R_C$ 时, 即车辆产生速率低于或等于临界车流量产生速率 R_C 时, $\langle \Delta W \rangle = 0$, 交通网络处于非拥堵状态. 当 $R > R_C$ 时, 即车辆产生速率高于临界车流量产生速率 R_C 时, 序参量为非零正值, 交通网络中滞留的车积累越来越多, 网络会处于拥堵状态.

由于本文中假设车辆都通过最短路径到达目的地, 因此引入介数的概念来标示每个节点的连接度. 介数源于社会网络分析中个体的重要性^[6], 但从图论的角度看, 一个节点的介数标示网络中所有节点之间通过该节点的最短路径的条数, 在最短路由的前提和每个节点有相同的处理能力的情况下, 介数可以标示一个节点要处理的流量. 我们定义介数为:

$$g_i = \sum_{m \neq n} \frac{\sigma_{mn}(v)}{\sigma_{mn}} \quad (3)$$

其中, σ_{mn} 是节点 m 到节点 n 的最短路径条数, $\sigma_{mn}(v)$ 是节点 m 到节点 n 的需要经过节点 v 的最短路径条数. 一般来说, 介数大的节点, 也就是道路口, 更容易发生拥堵.

2 基于删边扩容的城市交通网络优化

2.1 删边扩容的方法

针对城市交通网络, 我们提出基于介数的删边扩容策略, 具体方法描述如下:

1) 计算每个节点 i 的介数 g_i ;

2) 给每条边赋予权值 $w_{ij} = g_i * g_j$; 其中 g_i 和 g_j 分别是一条边两端节点的介数, 并按边的权值从大到小排序;

3) 删除 w_{ij} 最大的那条边; 在此步骤需要注意三点: 若权值最大的边多于一条, 则随机选择一条删除; 删边时要以保持交通网络畅通为原则, 如果删边后不能保持道路通畅, 则保留该边, 删去权值次大的边; 与“源”节点相连的边不能删去;

4) 根据删边后的网络, 重新生成城市交通结构矩阵;

5) 重复步骤 1)至 4), 直至删边数量达到给定的删边比例 t_d .

2.2 仿真结果及分析

在仿真实验中, 我们以 TSIS 为仿真平台, 对第 2 节中建立的城市交通模型进行删边扩容的仿真研究. TSIS (Traffic Software Integrated System), 是美国联邦公路管理局(FHWA)开发的一款交通仿真软件. 它的核心是 CORSIM 模块, 也是 TSIS 所有部件中的中心部件, 主要作用是实现交通状况的仿真并计算仿真结果, 最终输出仿真结果.

我们设置每个路段的长度均为 0.5km, 每个路口具备相同的通行能力, 路口各方向的通行速率为 60(veh/min), 车辆的源节点和目的地均为随机选择, 抵达目的地的车辆从网络中删除, 输入的车流率 R 的范围是 0 到 650(veh/min). 这样的设置不失普遍性, 且对仿真需要看到的效果不产生影响.

图 3 显示了不同删边比例下车流率 R 与序参量 μ 之间的关系. 在图中可以看出, 当删边比例 t_d 确定时, 车流率 R 小于对应的 R_C 值, 则序参量 μ 一直为 0; 当 R 大于 R_C 后, 序参量 μ 也大于 0, 且随着 R 值增加.

也就是说, 相应的车流率临界值 R_C 可以表征城市交通网络的容量, R_C 值越大, 说明城市交通容量越大, 运输效率越高. 如图所示, 当删边比例 $t_d = 0$ 时, $R_C = 90$, 说明不采用删边策略时, 城市的交通容量较低, 效率较差. 而当删边比例为 0.05, 0.10 和 0.15 时, 相应的 R_C 值也在增大.

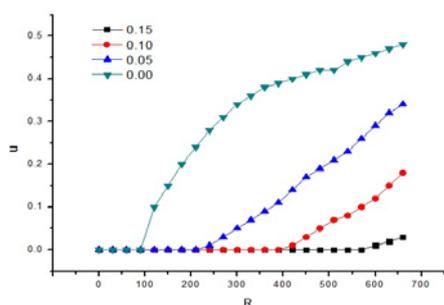


图 3 不同删边比例下车流率 R 与序参数 μ 的关系

在做了更深入的仿真研究后,我们可以分析出更多的结果.图 4 给出了不同删边比例下对应的临界车流率 R_c 值和平均最短路径长度 L 值. R_c 值曲线呈现出倒 U 型,而 L 值曲线在 $t_d \leq 0.4$ 时增长缓慢,当 t_d 趋向 0.5 时则增长较快.

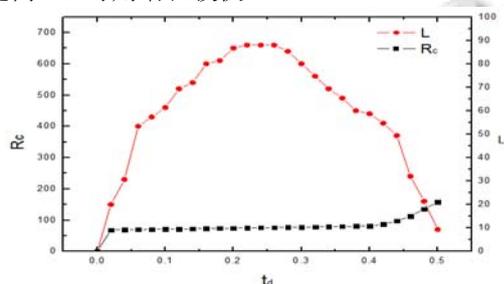


图 4 删边比例 t_d 与临界车流率 R_c 和平均最短路径长度 L 关系

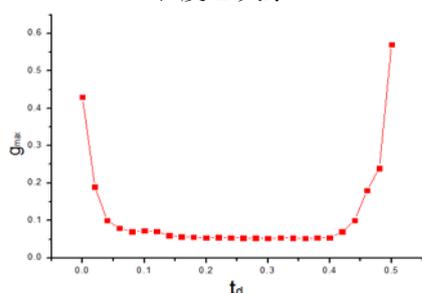


图 5 删边比例 t_d 与介数最大值 g_{max} 的关系

由此可知,当删去交通网络中的少部分路段时,对车辆的平均最短路径长度影响不大,却可以增加交通网络容量,增加运输效率.但当删去的路段较多时,车辆行驶的路程显著增加,而交通网络容量明显减少.图 5 给出了删边比例与网络中节点介数的最大值的关系,从图中可以看出 g_{max} 曲线为正 U 型.我们在对图 4 和图 5 的对比分析中可以发现,交通网络的容量与该网络中节点介数的最大值成反比,这也与文献[7][8]所提出的结论相同.对于该结论我们做出如下分析:从删边扩容方法可知,一开始我们删除了权值较高的边,相应的节点的介数就会降低,但当删边比例趋近于 0.5

时,也就意味交通网络中近一半的路段封闭,车辆在最短路径的前提下可选道路急剧减少,在 R 不变的情况下,每个节点的介数又重新升高.

从仿真结果中我们可以得出以下结论:删去交通网络中权重较大的路段时,剩余的道路资源在可承受的范围内,所以一定程度上可以有效地提高交通网络的容量和运输效率,另外还可以降低运营和维护费用;但删边比例过大时,最短路径 L 道路数量会急剧下降,再加上剩余道路资源紧张,大量的车辆都会寻找路径次短的道路,道路利用率降低,反而降低了交通网络容量.

3 总结

删边扩容的思想其实早已不自觉的应用于城市交通网络中,比如某些大城市的道路主干网采用“放射加环状”的结构^[9,10],从而为车辆避免集中走市中心路段(理论上介数较大的路段)提供了方便,这就类似于删边的效果.针对城市交通拥堵问题,本文建立了一个具有代表性的城市交通网络模型,基于介数提出了具体的删边扩容方法,并进行了验证,从而证明了删边扩容效应在交通网络中的有效性.由于诸多因素的限制,本文建立的城市交通网络模型相对简单,且由于不同的交通网络和不同的车流率,所产生的最佳删边比例也可能不同,因此在以后的工作中,如何选取最佳删边比例也将成为研究重点方向.

参考文献

- 1 杨兆升.智能运输系统概论.北京:人民交通出版社,2003.
- 2 苏兵,崔晓,姬浩等.片堵塞对城市路网性能的影响研究.系统工程,2015,(9):116-121.
- 3 蔡春梅.复杂网络与城市交通网络复杂性研究.软件导刊,2013,(4):120-123.
- 4 方小生.随机网络控制系统的性能分析与鲁棒控制[博士学位论文].上海:上海交通大学,2009.
- 5 王力,李岱,何忠贺,等.基于多智能体分群同步的城市路网交通控制.控制理论与应用,2014,(11):167-169.
- 6 陈小锋,史忠科.城市交通干线信号动态优化控制方法.西北工业大学学报,2010,(4):579-584.
- 7 柴干,赵倩,蒋珉.城市智能交通信号控制系统的设计与开发.浙江大学学报,2010,(7):34-38.
- 8 莫孝源.城市交通网络的控制与仿真研究[硕士学位论文].上海:上海交通大学,2010.
- 9 张国清,程苏琦.小世界网络中的删边扩容效应.中国科学:信息科学,2012,(2):159-158.
- 10 姚佼,徐洁琼,韩印.基于聚类分析的城市交通 TOD 优化控制方法.交通运输工程学报,2014,(6):345-348.