

文章编号:1001-9081(2010)04-1107-03

区域交通信号系统节点分析及优化策略研究

李颖宏^{1,2}, 王力², 尹怡欣¹

(1. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100080; 2. 北方工业大学 智能交通研究所, 北京 100144)

(lyh427@ncut.edu.cn)

摘要: SCOOT、SCATS 等区域交通信号控制系统的关键路口通常根据交叉口交通流量、道路联接数等指标来确定, 很难保证“蓄意”交通事件下区域网络运行的有效性。鉴于城市交通网络的无标度特性, 以路段阻抗为权重将城市交通网络抽象为复杂加权网络, 提出以网络凝聚度为指标的加权节点收缩方法, 评估交叉口节点的重要性, 解决区域交通网络 hub 点的选择问题, 并用实例说明该方法的有效性, 进而以 SCATS 系统为对象提出基于 hub 点选择的系统优化策略。

关键词: 无标度网络; hub 点; 区域交通信号控制系统; 加权节点收缩法

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Node analysis and optimization strategy for regional traffic network system

LI Ying-hong^{1,2}, WANG Li², YIN Yi-xin¹

(1. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100080, China;

2. Laboratory of Intelligent Transportation System, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Generally speaking, key junction nodes of typical urban region traffic network control system like SCOOT and SCATS need to be defined according to traffic flow and connected links number in reality. However, once the attack of traffic incident in hub node happened, it is difficult to insure the effectiveness and stability of whole traffic network. Considering the free scale features of urban traffic network, this paper discussed how to select hub node in weighted complex traffic network, adopted weighted node contraction method to evaluate node importance, which took network agglomeration as index. And the effectiveness of the method was proved through an application case. Then the optimization strategies for SCATS system based on hub node selection were provided.

Key words: free scale network; hub point; region traffic signal control system; weighted node contraction method

0 引言

以绿信比-信号周期-相位差优化技术 (Split-Cycle-Offset Optimization Technique, SCOOT)、悉尼自适应交通协调控制系统 (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System, SCATS) 为代表的区域信号控制系统通常依据相邻交叉口交通流量的变化、车流分散程度、交叉口道路联接数等经验因素来划分子区域^[1], 并根据流量大小赋予子区中某些“关键”交叉口以较高的信号周期权值。随着我国城市道路网络基础设施建设规模不断扩大、道路交通需求急剧增长, 城市交通网络结构的复杂性显著增加, 部分关键交叉口节点 (hub 点) 发生交通事件 (如信号灯失效、交通事故、道路施工等) 时往往会导致整个区域交通网络瘫痪^[2-3]。如何找出城市交通网络 hub 点并保持 hub 点在“蓄意”交通事件下控制子区的网络有效性具有重要的理论价值和现实意义。

复杂网络中通常以把节点的连接度 (节点连接的边数) 作为节点重要度的衡量标准^[4], 但诸如只有两条边相连的桥节点其联接度并不高。文献^[5]中定义了网络凝聚度概念并提出节点收缩法, 但未能考虑复杂加权交通网络中路段阻抗对于节点重要性的影响。而当前城市交通网络的复杂性研究则主要集中在地铁、街道、公共交通等网络的实证分析^[6]上,

至于如何将网络复杂性的研究成果应用于实际的交通管理中还未见相关文献报道。

本文在前人工作基础上提出加权节点收缩方法以解决复杂交通加权网络中 hub 点的选择问题, 进而提出基于 hub 点选择的 SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) 系统优化策略, 以期为城市区域交通信号控制系统的优化应用提供理论支撑。

1 城市区域交通网络的复杂性描述

城市交通系统本身是由道路系统、流量系统和管理系统组成的一个典型的、开放的复杂系统。如图 1 所示分别为芝加哥、圣地亚哥、上海和北京的城市交通结构。

从复杂网络分析的角度看, 城市交通网络可映射为复杂加权网络^[7], 即: 交叉路口或小区可对应于节点, 街道或道路对应于边, 车辆在边上行驶遇到的阻抗对应于边上的权重。复杂交通加权网络可用如下基本统计特征来进行描述。

1) 度和度分布。节点的度为连接该节点的边的总数, 所有节点的度的平均值称为网络平均值, 记为 $[k]$, 网络总节点的度分布用分布函数 $p(k)$ 表示。城市交通复杂加权网络的度表示某交叉口与之相连的路段数目, 由于交通网络的物理特性, 节点度数高的节点仅能说明其架构上的重要性, 并不

收稿日期: 2009-09-30; 修回日期: 2009-11-13。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60874052)。

作者简介: 李颖宏 (1968 -), 女, 北京人, 教授, 博士研究生, 主要研究方向: 智能控制、图像处理、计算机网络、智能交通控制; 王力 (1978 -), 男, 安徽肥东人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 区域交通控制、复杂网络应用; 尹怡欣 (1957 -), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士, 主要研究方向: 复杂系统的建模与控制、智能控制、智能管理。

能完全表征该节点在网络交通运行中的重要程度。既可能是节点度大的节点,也可能是流量大、关键分流点、交通客运枢纽等在整个网络中起关键性作用的点。在城市交通网络中,因此,单纯采用节点的度数来确定 hub 点并不恰当。

2) 聚集系数。聚集系数用来描述网络中节点的聚集情况,城市交通复杂加权网络的聚集系数 C_i 是指网络中交叉口 v_i 相邻的 k_i 个交叉口之间的连接情况。一般地,假设网络中的节点 v_i 有 k_i 条边和其他节点相连, k_i 个节点之间最多可能有 $k_i(k_i - 1)/2$ 条边。而 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能边数之比为节点 v_i 的聚集系数,即 $C_i = 2E_i/k_i(k_i - 1)$ 。

3) 平均路径长度。城市交通复杂加权网络中两个交叉口节点 v_i 和 v_j 之间的最短路径长度 d_{ij} 定义为连接这两个交叉口之间权重最小的路径长度。平均路径长度 L 是所有交叉口对的最短路径长度的平均值。不考虑自身到自身的距离,平均路径长度为:

$$L = \sum_{i \neq j} d_{ij} \cdot \frac{2}{N(N-1)} \quad (1)$$

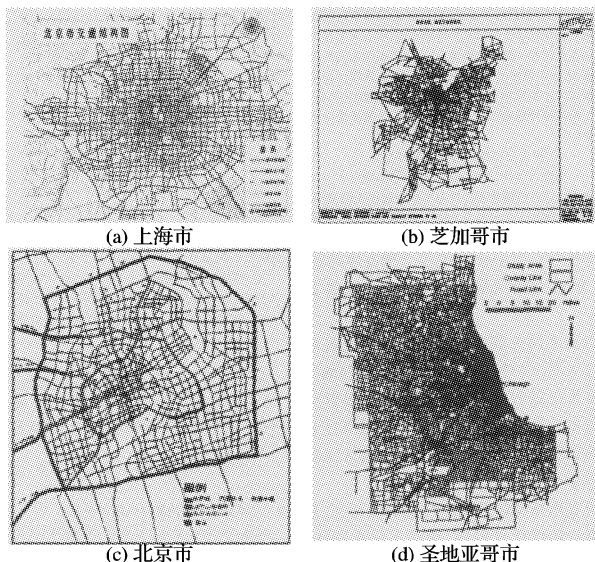


图1 上海、芝加哥、北京和圣地亚哥的交通系统结构

理论分析证明,复杂交通加权网络具有无标度网络特性,即对于随机事件的强鲁棒性和蓄意事件的结构脆性^[8-11]。考查复杂网络通常面临的两类攻击:随机性攻击和选择性攻击。一般来说,网络自身原因引起的损伤属于随机性攻击,而蓄意的破坏则属于选择性攻击。在城市交通网络中,随机性攻击可能是交叉口交通事故、交叉口红绿灯失效、交通管制等情况,而选择性攻击一般在恐怖袭击或者其他蓄意扰乱社会秩序行为发生时发生。当城市交通复杂网络的 Hub 节点在受到选择性攻击时,整个城市交通网络会有面临崩溃的危险。因此,在城市交通网络区域信号控制系统中,如何找出这样的 hub 点并保证该点交通秩序的稳定性与高效性就显得至关重要。

2 交通网络关键节点确定

文献[12]提出了节点收缩方法来确定一般复杂网络中的关键节点,将节点之间的边值均定义为1。由于城市交通复杂网络是加权网络,提出改进的加权节点收缩方法如下:

考虑如图2(a)所示的网络示意,设与节点 v_i 相连接的 n 条边的权值分别为 $k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}$ 。节点 v_i 收缩是指将与节点 v_i 相连接的 n 个节点都与节点 v_i 短接,即用一个新节点 v_i' 代替这 $n+1$ 个节点,原先与它们关联的边现在都与新节点关

联。这就相当于节点 v_i 将它周围的 n 个节点“凝聚成了一个节点”,如图2(b)所示。如果节点 v_i 是一个很重要的“核心节点”,那么将它收缩后整个网络将更好地凝聚在一起。

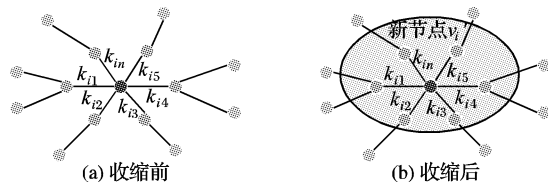


图2 复杂网络节点收缩方法

考虑以下网络凝聚度指标以评估节点收缩后的网络特性。

定义^[12] 复杂网络的网络凝聚度为网络节点数目与平均最短路径乘积的倒数。

由定义可知,复杂网络凝聚度的衡量标准有节点之间的平均最短路径 L 和网络中的节点数目 N ,即有:

$$\vartheta = \frac{1}{N \cdot L} = \frac{1}{N \cdot \frac{\sum_{i,j \in V} d_{ij}}{N(N-1)/2}} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} \quad (2)$$

为网络凝聚度,其中 d_{ij} 代表节点 i 与节点 j 之间的最短距离。显然有 $0 < \vartheta \leq 1$,当复杂网络中只有一个节点时,取最大值1。

由式(2)可知,复杂网络中节点收缩后得到的网络凝聚度将取决于两个因素。

1) 节点的度数。相同条件下,如果节点的度数越大,则将该节点收缩以后网络中节点和边的数目就减少,网络的凝聚度就越大,该节点越重要。

2) 节点在网络中的位置。如果节点处于“要塞”位置,很多节点对之间的最短路径都要经过该节点,那么收缩该节点以后将大大减少网络的平均最短距离,从而获得较大的网络凝聚度。

3 案例分析

以图3所示网络拓扑结构为例进行说明。图4为节点收缩后该网络的拓扑结构图,其中图4(a)~(f)分别为节点 $v_1 \sim v_6$ 收缩后的网络拓扑。

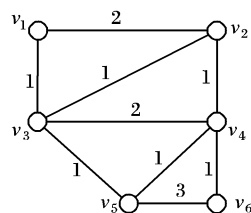


图3 某网络拓扑结构

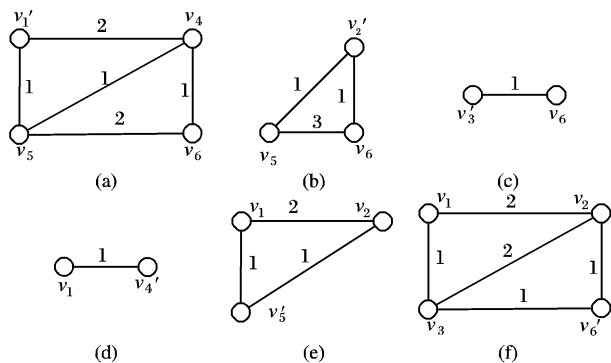


图4 节点收缩后的网络拓扑结构

分别计算各个节点的网络凝聚度:

$$\partial_{v1} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} = \frac{4-1}{2 \times (1+1+1+1+2)} = 0.25$$

$$\partial_{v2} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} = \frac{3-1}{2 \times (1+1+3)} = 0.2$$

$$\partial_{v3} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} = \frac{2-1}{2 \times 1} = 0.5$$

$$\partial_{v4} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} = \frac{2-1}{2 \times 1} = 0.5$$

$$\partial_{v5} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} = \frac{3-1}{2 \times (1+1+2)} = 0.25$$

$$\partial_{v6} = \frac{N-1}{2 \sum_{i,j \in V} d_{ij}} = \frac{4-1}{2 \times (1+1+1+2+2)} = 0.214$$

由上述计算结果可知,节点3和节点4的凝聚度最高(即最为重要),节点2的凝聚度最低;虽然节点6的度数要小于节点2,但由于加权网络边的权值不同,其凝聚度仍高于节点2,这也从侧面说明了复杂网络的节点度数并不能完全代表节点的重要程度。

4 节点重要度在 SCATS 系统优化中的应用

SCATS 信号系统是应用感应控制对配时方案作局部调整的选择系统^[13],在我国的海、杭州、沈阳等城市已应用多年。为适应城市交通网络结构的快速变化、确保在新的交通需求条件下继续发挥 SCATS 系统的控制优势,基于复杂网络分析的系统优化值得深入研究和实践。

SCATS 系统中,子区域划分与区域关键节点、绿信比、周期长和相位差是系统运行的核心与关键。其中,子区域划分及区域关键节点的选择具有全局性和较强的主观性,且不能从理论上保证整个受控网络的可靠性,可采用前述复杂网络节点重要度分析进行优化。交叉口绿信比与周期长度均取决于各周期内类饱和度,二者具有较强的相关性,且需要经过多个周期的计算和比较,宜保持相对稳定。而每个周期内都要对交叉口间相位差进行实时选择,具有较大的灵活性,单纯依照经验取值的方法随意性较大^[14]。因此,考虑从以下两方面提出优化策略。

1) 基于复杂网络节点重要度分析的区域 hub 点选择。理论上,关键节点需要随着交通需求的变化进行灵活改变,当区域内的交通需求处于非饱和状态下时,SCATS 系统本身的选择方法具有较高的适应性。但当区域内的交通需求处于饱和状态甚至超饱和状态下时,如我国北京、上海、广州等城市的早晚高峰时段,网络 hub 点附近交通事件的发生极易导致整个 SCATS 系统的崩溃,而依据基于加权节点收缩法选择 hub 点并重点保持 hub 点的通畅,可大大提高网络运行的可靠性。

2) 以交叉口间旅行时间预测为参考优化交叉口间的相位差(如图5所示)。图5中,通过 SCATS 系统感应线圈采集到的实时交通流数据和历史数据,运用智能算法实现交叉口排队长度的预测,进而结合当前信号周期长及绿信比预测车辆到达下游交叉口所需要的旅行时间。将预测的旅行时间与现有下游相位差进行比较,若误差小于 10% 则仍保持现有下游交叉口相位差不变,否则主动调整下游交叉口相位差并输入到本地信号控制器。

5 结语

本文依据无标度网络的特性探讨了确定复杂网络 hub 点的加权节点收缩法,并从 SCATS 系统的区域 hub 点确定和交叉口间相位差优化方面对 SCATS 系统的优化策略进行了讨论。基于复杂网络分析的城市区域交通信号控制优化方法,既从宏观网络属性角度对城市交通网络控制的可靠性和有效性提供了理论支持,又充分利用现有先进信号控制系统的优秀成果,值得继续深入实践。

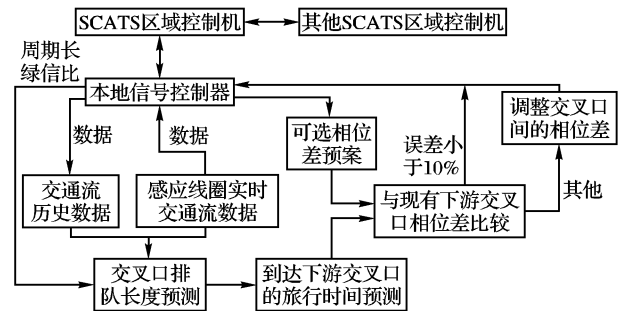


图5 SCATS 系统相位差优化方法

参考文献:

- [1] 尚德申, 石建军. 交通控制区域动态划分研究[J]. 道路交通与安全, 2007, 7(1): 27-29.
- [2] 千龙新闻网. 北京京广桥附近路面塌陷交通临时管制[EB/OL]. [2006-01-03]. <http://news.sina.com.cn/c/2006-01-03/10448761158.shtml>.
- [3] 信息时报. 广州天河路口拥堵问题严重, 红绿灯全部失效[EB/OL]. [2009-04-06]. http://news.dayoo.com/guangzhou/200904/06/53872_5618393.htm.
- [4] 王勋, 凌云, 费玉莲. 基于 Web 日志和缓存数据挖掘的电子商务推荐系统[J]. 情报学报, 2005, 24(3): 324-328.
- [5] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 11(11): 80-102.
- [6] 高自友, 赵小梅, 黄海军, 等. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(3): 41-47.
- [7] STROGATZ S H. Exploring complex networks [J]. Nature, 2001, 410: 268-276.
- [8] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks [J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256.
- [9] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 33-45.
- [10] 何大彻, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 112-124.
- [11] 方锦清, 汪小帆, 刘曾荣. 略论复杂性和非线性复杂网络系统的研究[J]. 科技导报, 2004(2): 9-12, 64.
- [12] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(11): 79-83.
- [13] ATS Technology (HK) Limited. SCATS Adaptive Control Introduction [EB/OL]. [2009-09-01]. http://www.scats.com.au/product_adaptive_control.html.
- [14] 陈家静. SCATS 系统运行效果及功能实现分析[J]. 广东公安科技, 2002, 20(4): 59-62.
- [15] 陈关荣. 复杂动力网络的研究将是新世纪科学技术前沿的战略课题之一[C]// 复杂网络——系统结构研究文集(第二集). 上海: 上海理工大学, 2004: 115-116.
- [16] 郭雷, 许晓鸣. 复杂网络[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2006.