

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于拥堵系数的道路网络关键路段辨识

王立夫, 钟昊男, 郭戈

引用本文:

王立夫, 钟昊男, 郭戈. 基于拥堵系数的道路网络关键路段辨识[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 843–849.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1421>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于两级筛选机制及深度学习组合模型实现短时交通流预测](#)

Combination model of short-term traffic flow prediction based on two-level screening mechanism

*控制与决策*. 2023, 38(1): 84–92 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0929>

#### [基于时空图卷积循环神经网络的交通流预测](#)

Traffic flow prediction based on STG-CRNN

*控制与决策*. 2022, 37(3): 645–653 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1445>

#### [区分交通流模式的混合服务路口信号控制策略](#)

Signal control strategies of mixed service intersections to discriminate traffic flow patterns

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1509–1515 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1520>

#### [一种面向严重受损路网的抢修队调度算法](#)

An algorithm for repair crew scheduling on severely damaged road network

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1663–1671 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1582>

#### [基于FWADE-ELM的短时交通流预测方法](#)

Short-term traffic flow forecasting based on hybrid FWADE-ELM

*控制与决策*. 2021, 36(4): 925–932 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1103>

# 基于拥堵系数的道路交通网络关键路段辨识

王立夫<sup>†</sup>, 钟昊男, 郭 戈

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 城市道路交通的路段信息与车流量信息对道路的安全、高效运行至关重要. 在交通高峰时期, 通过对关键路段加以控制, 可实现整个道路交通网络的完全能控. 为寻找路网中的关键路段, 将道路网络的交叉口-节点模型转化为道路网络的路段-节点模型, 基于路段信息与车流量信息提出拥堵系数来衡量道路交通网络的车辆拥堵程度, 并将其作为道路网络的路段-节点模型的边权重, 最后运用关键路段辨识算法对道路交通网络的关键路段进行辨识. 以沈阳市皇姑区主城区道路为例建立以拥堵系数为权重的网络模型, 按照所提方法辨识的关键路段数量为 14 条, 约占道路网络总路段数的 14.3%, 具有较低的控制成本, 且大部分为由北向南方向和由西向东方向. 其中 8 条路段分布在皇姑区道路实时拥堵排行前 5 名, 约占关键路段总数的 57.1%, 表明所给出的关键路段更多地分布在交通状态较为拥堵的路段上, 符合实际情况.

**关键词:** 交通网络; 关键路段; 能控性; 拥堵系数; 路段-节点模型; 复杂网络

中图分类号: TP373

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1421

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 王立夫, 钟昊男, 郭戈. 基于拥堵系数的道路交通网络关键路段辨识[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 843-849.

## Identification of key road sections of road traffic network based on congestion coefficient

WANG Li-fu<sup>†</sup>, ZHONG Hao-nan, GUO Ge

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The road section information and traffic flow information of urban road traffic are vital to the safe and efficient operation of road traffic. During the traffic peak period, by controlling the key road sections, we can achieve the entire road traffic network fully controllable. In order to find the key road sections in the road network, this paper transforms the intersection-node model of the road network into the section-node model of the road network. Based on the road section information and traffic flow information, a congestion coefficient is proposed to measure the vehicle congestion degree of the road traffic network, and it is used as the edge weight of the section-node model. Finally, the key road section identification algorithm is used to identify the key road sections of the road traffic network. Taking the main urban roads in Huanggu District of Shenyang as an example, a network model with congestion coefficient as weight is established. The number of key road sections identified according to the method in this paper is 14, accounting for about 14.3% of the total sections of the road network, which has low control cost, and most of them are from north to south and from west to east. Among them, 8 road sections are distributed in the top five of the real-time road congestion ranking in Huanggu District, accounting for about 57.1% of the total number of key road sections. This shows that the key road sections given in this paper are more distributed in the road sections with congested traffic conditions, which is in line with the actual situation.

**Keywords:** traffic network; key road section; controllability; congestion coefficient; road section-node model; complex network

## 0 引言

随着经济的发展以及城市居住人口的增加,人们对交通资源的需求迅猛增长,尤其在早晚高峰时期道

路的车辆拥堵情况十分严重,对城市道路交通的正常运行提出严峻的挑战. 为了减少拥堵状况的发生,人们需要对道路网络中的关键路段进行辨识,并对关

收稿日期: 2021-08-13; 录用日期: 2021-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573077, U1808205); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N2023022, N2123002).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: wlfkz@qq.com.

键路段加以控制,从而使整个道路网络达到理想的状态.目前的控制方法主要是针对交叉口处的车流控制,如基于蒙特卡罗树搜索的交叉口优化模型的控制方法<sup>[1]</sup>,通过对交叉口的动态演化进行显式建模,解决了沟道化区段溢出动态演化显式建模的交叉口优化问题;基于n-step Q-network 交通信号控制器(nQN-TSC)模型的控制方法<sup>[2]</sup>,通过该控制器来优化控制交叉口信号灯的相位时间,在不影响路口车辆吞吐量的情况下降低了车辆的平均延误;基于相位间隙可靠度(PCR)的多阶段随机规划的控制方法<sup>[3]</sup>,在自适应控制下对协调交叉口的基准配时方案和绿灯分流调整进行了优化,减少了交叉口车辆的平均延误和平均剩余排队长度.然而,按照传统方法对交叉口处的车流进行疏导,对于缓解整个路网的拥堵状况能力有限,并且未从理论层面给出控制哪些关键路段可实现整个路网的完全能控.

随着复杂网络的相关理论研究在交通网络中的不断深入,目前的研究主要从以下几个方向开展,一是针对交通网络的一般特性参数的分析,如Masucci等<sup>[4]</sup>对伦敦路网建立网络模型后,通过对网络特性的进一步研究发现,该路网具有自组织的特性;Sienkie等<sup>[5]</sup>对波兰21个城市的公交网络进行建模,并对其进行了拓扑特性分析,结果表明多数城市的公交网络都具有“小世界”的特性,且度分布均满足幂律分布.二是针对交通网络建模方式的分析,如Rinaldi<sup>[6]</sup>以道路节点处的车辆数为状态变量,分别推导出带有定价控制器与交通信号灯的的网络动力学模型,从而构建了完整的道路网络动力学模型;Yang等<sup>[7]</sup>基于公交站点和线路地理位置信息提出了ES模型,通过建立不同城市公交网络的ES模型并研究,发现网络具有与前人研究一致的网络特征,以及一些新的特征.三是针对交通网络的级联抗毁性、鲁棒性等属性的分析,如李成兵等<sup>[8]</sup>基于城市的客运交通网络构建复合交通网络级联失效模型,运用蓄意攻击等策略对网络进行攻击,并对城市的客运交通网络的级联抗毁特性进行了分析;Duan等<sup>[9]</sup>对道路网络以3种不同的粒度进行建模,并对6个不同城市的道路网络进行实证研究,结果发现以不同粒度建模的城市道路网络具有不同的拓扑结构,在对道路网络的鲁棒性分析时应该对于给定的交通情况以适当的粒度进行建模.

综上所述,以上应用复杂网络研究道路交通都是将交叉口抽象为节点,道路抽象为边,但对于城市道路交通而言,交通高峰期拥堵的位置往往是路段,而非道路交叉口处,故仅针对信号灯路口处的车流控制难以有效缓解整个路网的拥堵状态.因此,本文

利用“点边互换”的方式,建立道路网络的路段-节点模型,并给出拥堵系数的定义,用以衡量路段上的车辆拥堵程度;根据最大匹配思想对道路网络的可控性进行研究,辨识能使道路网络完全能控的关键路段,通过对关键路段的控制实现整个路网的完全能控.以沈阳市皇姑区主城区道路网络为例,建立网络模型求取其关键路段,并应用高德地图提供的道路实时拥堵数据<sup>[10]</sup>与所求取的关键路段进行对比分析.

## 1 道路网络模型与复杂网络的可控性

### 1.1 道路网络模型

构建城市道路网络模型,需要对实际的道路进行抽象,将交叉口抽象为节点,路段抽象为边,节点与边的连接构成道路网络的拓扑结构.这种构建模型的方法可以直观地表示交叉口与路段之间的地理关系,保留了道路网络原始的拓扑结构,所构建的模型称为道路网络的“交叉口-节点”模型.

如图1所示的小型道路网络中共有4个交叉口,4条路段,建立其道路网络的交叉口-节点模型时,首先将网络中的4个交叉口抽象为a, b, c, d四个节点向网络中添加边时,因为现实中的道路往往是双向行驶的,所以在节点ab、ac、cd、bd之间存在方向相反的两条边.对相应的边进行标号,建立图1所示的道路网络的交叉口-节点模型如图2所示.

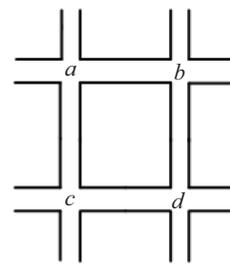


图1 小型道路及交叉口示意图

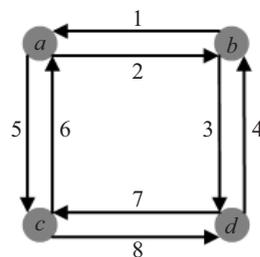


图2 道路网络的交叉口-节点模型

### 1.2 复杂网络的可控性

对于具有 $N$ 个节点的复杂网络,系统的线性时不变动态特性可以用状态方程描述为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t). \quad (1)$$

其中:向量 $\dot{x}(t)$ 为 $N$ 个节点在 $t$ 时刻的状态; $A$ 为 $N \times N$ 的状态矩阵; $B$ 为 $N \times M$ 的输入矩阵,表示网络外

部有  $M$  个控制节点对网络内部节点有作用;  $u(t)$  表示加在  $M$  个外部控制节点上的状态信号.

对于式 (1) 所示的系统, 其可控性的定义为: 如果存在一个分段连续的输入  $u(t)$ , 能够在有限的时间  $[t_0, t_f]$  内使得系统从任意的初始状态  $x(t_0)$  转移到任意的终止状态  $x(t_f)$ , 则称此系统状态是完全可控的. 现实中的真实网络, 其边上的权重往往是未知的. 因此, 为了更好地描述真实系统, Lin<sup>[11]</sup> 提出了结构可控性的概念. 为了更清楚地描述结构可控性, 现给出如下定义<sup>[12]</sup>:

**定义 1 (结构矩阵)** 对于一个矩阵  $A^*$ , 如果它的元素要么是零, 要么是一个自由参数, 则称矩阵  $A^*$  是结构矩阵.

**定义 2 (定值矩阵)** 对于一个矩阵  $A_1$ , 如果它的元素是一个确定的常数, 则称矩阵  $A_1$  是定值矩阵.

**定义 3 (结构可控)** 对于一个由结构矩阵组成的  $(A^*, B^*)$  系统, 如果存在一个完全可控的定值系统  $(A_1, B_1)$ , 并且  $(A_1, B_1) \in (A^*, B^*)$ , 则称系统  $(A^*, B^*)$  是结构可控的.

结构可控性表明, 对于由结构矩阵组成的系统, 如果其对应的定值矩阵中有一个可以使系统达到完全可控, 则系统被称为是结构可控的. 如果一个系统是结构可控的, 则对于其所有的参数组合, 系统都是完全可控的. 总体而言, 如果一个定值系统被看作是结构系统并被证明是结构可控的, 则原定值系统或本身是完全可控的, 或在轻微扰动后是完全可控的.

Liu 等<sup>[13]</sup> 将图论中的匹配理论方法与结构可控性相结合, 提出了一种基于最大匹配算法求解最小驱动节点集的可控性分析框架, 并给出了最小输入定理如下.

**引理 1**<sup>[13]</sup> 完全控制有向网络  $G(A)$  所需要的最少输入节点数  $N_I$  或者最少驱动节点数  $N_D$  取决于网络  $G(A)$  的最大匹配. 若  $G(A)$  存在完美匹配, 则  $N_D = 1$ , 并可选取网络中的任一节点作为驱动节点; 若  $G(A)$  不存在完美匹配, 则  $N_D$  等于网络中未被匹配的节点数, 且未被匹配的节点就为所寻找的驱动节点. 即  $N_I = N_D = \max\{N - |M^*|, 1\}$ , 其中  $M^*$  为网络  $G(A)$  的一个最大匹配.

## 2 道路网络模型改进与关键路段辨识算法

### 2.1 道路网络模型改进

为了寻找道路网络中的关键路段, 受文献[14]的启发, 本文利用“点边互换”的思想将道路网络的交叉口-节点模型转化为道路网络的路段-节点模型. 道路网络的路段-节点模型将路网中的路段抽象为节点, 路段之间的连接与指向关系抽象为边. 例如, 在道

路网络的交叉口-节点模型(图2)中不同方向共有8条路段, 将每条路段都抽象为一个节点, 所以在其道路网络的路段-节点模型中共有8个节点. 接下来, 根据路段之间的连接与指向关系向路段-节点模型中添加边, 例如, 在图2中车辆由路段1可以仅通过一个交叉口  $a$  到达路段5与路段2, 所以在其路段-节点模型中分别存在一条由节点1指向节点5和由节点1指向节点2的边; 车辆由路段1无法仅通过一个交叉口到达路段3、4、6、7、8, 所以在其路段-节点模型中不存在由节点2指向节点3、4、6、7、8的边. 将图2所示道路网络的交叉口-节点模型转化为道路网络的路段-节点模型如图3所示.

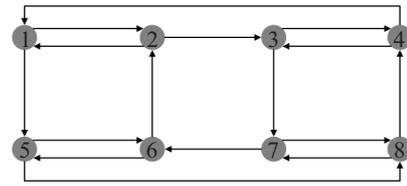


图3 道路网络的路段-节点模型

在建立带有拥堵信息的道路交通网络时, 需要在道路网络的路段-节点模型的基础上添加相应的权重. 根据文献[15]对交通拥堵的研究可知, 交通拥堵指标大致上与路段限行速度、交通密度、实际出行速度、道路交易量等因素有关. 但是除此之外, 路段信息与车流量信息在一定程度上也会对交通拥堵指标造成影响. 因此本文在道路网络的路段-节点模型的基础上, 考虑与路段限行速度  $V_{kd}$ 、车辆在路段上的实际平均行驶速度  $V_{kt}$ 、路段的车道数  $n$ 、每条车道的宽度  $l$ 、车辆及其停车间距的平均占地面积  $S$ 、车辆在路段上的行驶时间  $t$ 、 $t$  时间内驶入该路段的车辆数  $Q$  有关的拥堵系数  $\alpha$  作为道路网络的路段-节点模型的边权重. 拥堵系数的计算公式为

$$\alpha = Q \cdot (t \cdot V_{kd} \cdot l \cdot n \cdot S^{-1})^{-1} \cdot V_{kt}. \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 拥堵系数  $\alpha$  与传统的交通拥堵指标<sup>[15]</sup> 相比增加了路段信息与车流量信息, 使得拥堵系数的计算结果可反映各路段实时的拥堵情况. 当路段上的车辆数一定时, 路段的宽度越窄, 车道数越少, 则路段上车辆的密度越大, 车辆的行驶速度越缓慢, 一定时间内驶入该路段的车辆数越少, 所以拥堵系数越小, 表明路段越拥堵. 特别地, 当  $V_{kt} \geq 0.7V_{kd}$  时, 即车辆在路段的实际平均行驶速度达到路段限行速度的70%时, 则可认为路段此时是不拥堵的. 在理想状态下,  $t$  时间内驶入路段的车辆数等于此时间段内路段的额定车容量数, 此时  $\alpha$  的计算结果在数值上等于  $V_{kt}$ , 故定义在路段不拥堵时  $\alpha = V_{kt}$ .

### 2.2 关键路段辨识算法

将拥堵系数作为权重加入到道路网络的路段-节点模型中,利用复杂网络的可控性理论,通过道路网络的路段-节点模型中的驱动节点,找出能实现整个道路网络完全能控的关键路段. 根据引理1可知,要寻找驱动节点,需要求解网络的最大匹配,但求解最大匹配的算法只适用于无权网络,并不适用于有权网络. 因此,本文采用KM算法<sup>[16-17]</sup>求解出道路网络的路段-节点模型中的最大权匹配,其中将未被匹配的节点作为控制节点(即为路网中的关键路段).

在介绍KM算法之前,先给出如下几个定义.

**定义4**(二分图) 设 $G = (D, E)$ 为一个无向图,若顶点 $D$ 可以分割成两个互不相交的集合 $(U, V)$ ,且边集 $E$ 中的每条边所关联的两个顶点 $i$ 和 $j$ 分别属于这两个不同的集合 $(U, V)$ ,则称图 $G$ 是一个二分图.

**定义5**(标杆值)  $x_i^+$ 与 $x_j^-$ 分别对应一个值,称为标杆值,顶点 $x$ 的标杆值记为 $B(x)$ , $x_i^+$ 与 $x_j^-$ 的标杆值满足 $B(x_i^+) + B(x_j^-) \geq \omega(x_i^+x_j^-)$ .

**定义6**(相等子图) 在二分图中所有满足 $B(x_i^+) + B(x_j^-) = \omega(x_i^+x_j^-)$ 的边所构成的图称为相等子图,记为 $G_B$ .

**定义7**(增广路径) 若 $P$ 是二分图中一条连接两个集合 $(U, V)$ 中未匹配顶点的路径,并且未匹配的路径与匹配的路径在 $P$ 上交替出现,则称 $P$ 是一条增广路径.

KM算法的具体操作步骤如下.

**step 1:** 将网络转化为二分图. 将网络的顶点 $x_i$ 分割为 $x_i^+$ 与 $x_i^-$ ,其中 $x_i^+$ 在集合 $U$ 中, $x_i^-$ 在集合 $V$ 中. $x_i^+$ 表示信号流出的一端, $x_i^-$ 表示信号流入的一端. 网络的边集记为 $E$ ,若在集合 $E$ 中存在一条由顶点 $i$ 指向顶点 $j$ 的边,则在二分图中有 $x_i^+ \rightarrow x_j^-$ .

**step 2:** 初始化标杆值.  $B(x)$ 的初始化取值为

$$\begin{cases} B(x_i^+) = \max w(x_i^+x_j^-), x_i^+ \in x^+, x_j^- \in x^-; \\ B(x_j^-) = 0, x_j^- \in x^-. \end{cases} \quad (3)$$

根据初始化后的标杆值选择出相等子图 $G_B$ ,即满足 $B(x_i^+) + B(x_j^-) = \omega(x_i^+x_j^-)$ 的边的集合,并在 $G_B$ 中任意选择一组匹配 $M$ .

**step 3:** 检查 $M$ 是否是最大权匹配. 若 $M$ 中每个 $x^+$ 的顶点都被匹配,则 $M$ 即为最大权匹配,算法终止;否则,取 $M$ 中未被匹配的顶点 $u \in x^+$ ,令 $Z = \{u\}, H = \emptyset$ .

**step 4:** 修改标杆值. 求解与 $Z$ 中每个顶点 $x_i^+$ 都连接的顶点 $x_j^-$ 的集合,记 $X = \{x_j^- | x_i^+ \in Z, x_i^+x_j^- \in E\}$ ,如果 $X \supset H$ ,则转至step 5;否则,令 $X = H$ ,计算

$$d_B = \min\{B(x^+) + B(x^-) - w(x^+x^-) | x^+ \in Z \& x^- \notin H\}.$$

由 $d_B$ 修改新的标杆值为

$$\begin{cases} B'(x^+) = B(x^+) - d_B, x^+ \in Z; \\ B'(x^-) = B(x^-) + d_B, x^- \in H. \end{cases} \quad (4)$$

其他未做修改的标杆值保持原值不变. 修改新的标杆值后,重新确定相等子图,并在其中任意选择一组匹配 $M$ ,转至step 3.

**step 5:** 在 $X \setminus H$ 中选择一个顶点 $x_j^-$ ,确定 $x_j^-$ 在 $M$ 中是否已被匹配,若已被匹配,即 $x_i^+x_j^- \in M$ ,则令 $Z = Z \cup \{x_i^+\}, H = H \cup \{x_j^-$ ,转至step 4;若 $x_j^-$ 在 $M$ 中未被匹配,即 $x_i^+x_j^- \notin M$ ,则取一条由顶点 $u$ 到顶点 $x_j^-$ 的增广路径 $P$ ,令 $M = M \oplus P$ ,转至step 3.

## 3 关键路段辨识算法在沈阳市皇姑区道路网络中的应用

### 3.1 道路网络建模与数据处理

本文以沈阳市皇姑区主城区部分主要主干路与次干路(如图4所示)为例,运用关键路段辨识算法寻找其关键路段.



图4 沈阳市皇姑区主城区道路图

首先根据路网的拓扑结构对道路网络进行建模,按照第1.1节中的方法,建立沈阳市皇姑区主城区道路网络的交叉口-节点模型,再按照第2.1节中的方法,将道路网络的交叉口-节点模型转化为道路网络的路段-节点模型如图5所示,网络中共有98个节点,324条边.

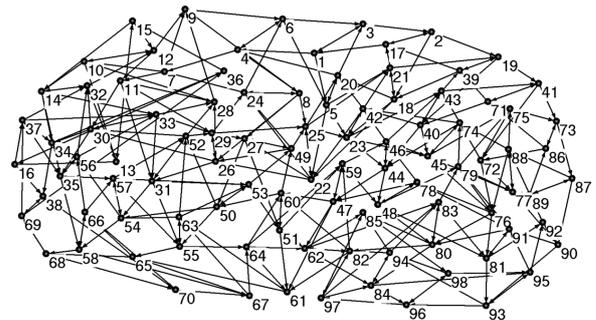


图5 沈阳市皇姑区主城区道路网络的路段-节点模型

作者及团队成员于2021年4月30日对皇姑区主

城区的主要主干路与次干路的车道数、路段限行速度与路段宽度进行实地考察与测量(结果如表1所

示),并于早7:00~9:00间,统计各路段3 min内驶入的车辆数 $Q$ 及平均车速(结果如表2所示)。

表1 路段编号及路段数据

道路名称	对应路段编号	车道数 $n$ /条	路段宽度 $l$ /m	路段限行速度 $V_{kd}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
崇山西路	1,3	4	3.3	60
崇山中路	4,6,7,9,10,12	4	3.3	60
崇山东路	13,15	2	3.3	60
宁山西路	18,21	2	3.0	60
宁山中路	22,25,26,29,30,33	2	3.0	60
宁山东路	34,37	2	3.0	60
昆山西路	40,43	3	3.3	60
昆山中路	44,46,47,59,61,64,65,67	3	3.3	60
昆山东路	68,70	3	3.3	60
华山路	72,75,76,79,80,83,85,97	3	3.0	60
天山路	87,89,90,92,93,95	1,2	3.2	50
闽江街	96,98	1	3.3	50
珠江街	48,78,81,91	3	3.2	60
黄浦江街	77,88	3	3.3	60
岐山中路	50,53,54,57	1,2	3.2	50
淮河街	2,17,19,39,41,71	3	3.2	60
淮河南街	73,86	2	3.2	60
怒江街	5,20,23,42,45,74	2	3.3	60
长江街	8,24,27,49,51,60	2	3.3	60
长江南街	62,82,84,94	2,3	3.3	60
黄河南大街	11,28,31,52,55,63	3	3.4	60
北陵大街	14,32,35,56,58,66	4	3.4	60
黑龙江街	16,36,38,69	2	3.3	60

表2 各路段车辆数 $Q$ (3 min内驶入)及平均车速 $V_{kt}$

路段编号	$Q$ /辆	$V_{kt}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	路段编号	$Q$ /辆	$V_{kt}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	路段编号	$Q$ /辆	$V_{kt}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
1	195	10	34	104	10	67	148	10
2	183	13	35	194	10	68	97	12
3	75	7	36	84	17	69	143	16
4	175	9	37	162	11	70	176	13
5	86	6	38	74	15	71	133	9
6	179	9	39	147	10	72	103	5
7	189	9	40	254	12	73	55	10
8	71	5	41	168	11	74	64	5
9	195	10	42	68	5	75	74	5
10	214	11	43	151	10	76	94	5
11	280	14	44	174	12	77	128	8
12	156	8	45	84	6	78	212	15
13	65	12	46	192	9	79	108	5
14	314	11	47	236	11	80	123	6
15	119	13	48	344	17	81	221	16
16	139	15	49	88	6	82	158	7
17	69	8	50	70	5	83	103	5
18	70	5	51	82	6	84	91	9
19	165	12	52	256	12	85	87	7
20	59	6	53	35	6	86	93	9
21	61	6	54	53	5	87	109	11
22	102	6	55	190	14	88	147	7
23	106	7	56	257	9	89	60	10
24	68	6	57	82	6	90	59	10
25	152	8	58	172	9	91	256	13
26	106	7	59	147	10	92	75	9
27	58	5	60	61	5	93	105	10
28	173	12	61	166	11	94	118	8
29	114	8	62	176	8	95	107	10
30	135	9	63	264	12	96	89	11
31	254	12	64	232	11	97	183	9
32	216	11	65	153	11	98	52	9
33	118	8	66	157	8			

### 3.2 沈阳市皇姑区道路网络关键路段辨识及分析

据统计,家用车辆的平均长度为3.8 m~4.3 m,平均宽度为1.6 m~1.8 m,考虑到行(停)车之间的间距,本文取每辆车平均占地面积为10 m<sup>2</sup>,即式(2)中 $S = 10$ . 因此可以根据式(2)计算拥堵系数,并将其作为沈阳市皇姑区主城区道路网络的路段-节点模型的边权重. 根据表1和表2中的路段信息与车流量信息,由式(2)计算出网络的拥堵系数,网络的拥堵系数分布如图6所示.

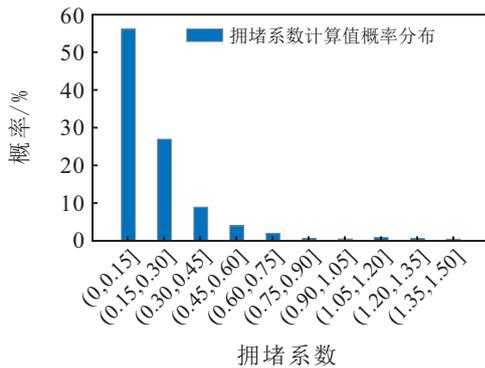


图6 拥堵系数分布

由图6可见,拥堵系数主要分布于区间(0, 0.15]和区间(0.15, 0.30]内,大约分别占总数的56.2%与26.5%,其次分布于区间(0.30, 0.45]内,大约占总数的9%,而在区间(0.45, 0.60]和区间(0.60, 0.75]内,其占总数的占比不足5%,甚至从区间(0.75, 0.90]开始,其占总数的占比不足1%. 由前文拥堵系数的定义可知,整体来看拥堵系数的计算结果偏小,即早高峰时期沈阳市皇姑区的道路交通状态是较为拥堵的. 将拥堵系数作为沈阳市皇姑区主城区道路网络的路段-节点模型的边权重,按照第2.2节的关键路段辨识算法辨识的关键路段结果如表3所示.

表3 权重为拥堵系数时关键路段的辨识结果

路段编号	所属道路	路段编号	所属道路
95	天山路	83	华山路
25	宁山中路	49	长江街
8	长江街	63	黄河南大街
10	崇山东路	60	长江街
88	黄浦江街	42	怒江街
57	岐山中路	20	怒江街
29	宁山中路	13	崇山东路

从表3可以看出,采取本文关键路段辨识算法从沈阳市皇姑区主城区路网(图4)中辨识的关键路段数量共有14条,约占路网总路段数的14.3%,相对较少,控制成本相对较低. 14条关键路段中有6条路段的方向为由北向南,路段编号分别为88、49、63、60、42、20,约占关键路段总数的42.9%;只有1条路段的

方向为由南向北,路段编号为8,约占关键路段总数的7.1%;有5条路段的方向为由西向东,路段编号分别为95、25、57、29、83,约占关键路段总数的35.7%;有2条路段的方向为由东向西,路段编号分别为10、13,约占关键路段总数的14.3%. 从辨识的关键路段结果来看,沈阳市皇姑区早高峰时期在道路由北向南方向与由西向东方向的拥堵情况要比由南向北方向与由东向西方向的拥堵情况更为严重. 因此,早高峰时期注重对皇姑区道路由北向南方向与由西向东方向的车流控制,可对缓解整个路网的交通压力起到一定的作用. 为了验证此算法,本文引用高德地图官方提供的沈阳市道路实时拥堵排行<sup>[10]</sup>作为对比指标. 采用同一天(2021年4月30日)早高峰时期由高德地图提供的道路实时拥堵数据,如表4所示(表4中所示的拥堵延时指数由高德地图提供,不同于本文定义的拥堵系数).

表4 沈阳市道路实时拥堵排行

排行	道路名称	拥堵延时指数
1	崇山东路(北海街到崇山中路-由东向西)	8.7
2	市府大路(东西快速干道到北顺城路-由西向东)	7.0
3	宁山中路(怒江街到黄河南大街-由西向东)	6.4
4	南五马路(文化路到胜利南街-由东向西)	6.2
5	胜利南街(中山路到玉屏路辅路-由北向南)	6.1
6	华山路(淮河街到皇寺路-由西向东)	5.7
7	长江街(泰山路到昆山中路-由北向南)	5.6
8	东西快速干道(由东向西)	5.4
9	东西快速干道(由西向东)	5.2
10	岐山中路(怒江街到北陵大街-由西向东)	5.1

因为高德地图官方提供的道路实时拥堵数据是针对整个沈阳市而不单针对沈阳市皇姑区,所以在表4中只有5条道路位于皇姑区,分别是崇山东路、宁山中路、华山路、长江街和岐山中路,故在2021年4月30日早高峰时期皇姑区道路拥堵排行的前5名依次为崇山东路(从北海街到崇山中路-由东向西)、宁山中路(从怒江街到黄河南大街-由西向东)、华山路(从淮河街到皇寺路-由西向东)、长江街(从泰山路到昆山中路-由北向南)、岐山中路(从怒江街到北陵大街-由西向东). 结合表3和表4可以看出,运用本文关键路段辨识算法辨识的14条关键路段中有8条路段分布在皇姑区道路实时拥堵排行前5名的道路上,路段编号分别为25、10、57、29、83、49、60、13,约占关键路段总数的57.1%,即将拥堵系数作为道路网络的路段-节点模型的边权重时,所辨识的关键路段更多地分布在交通状态较为拥堵的路段上,符合实际情况. 这说明拥堵系数可以保证在道路网络完全能控

的前提下,合理地选择出需要控制的路段,在关键路段的选择上具有良好的效果,在考虑整个路网的能控性时,应用拥堵系数构建道路网络模型辨识关键路段的方法能够为实际的关键路段选择提供有效的参考。

#### 4 结论

本文考虑寻找交通高峰时期所需控制的路网中的关键路段,建立了道路网络的路段-节点模型,提出拥堵系数的定义,并给出了道路网络关键路段的辨识方法。将拥堵系数作为路段-节点模型的边权重,使道路网络的路段-节点模型不仅能表示路段之间的连接与指向关系,还可以衡量路段上的车辆拥堵程度。应用此模型分析了沈阳市皇姑区主城区主要干路的关键路段辨识问题,采用的数据均为当天实测数据。研究结果表明,拥堵系数的整体计算结果反映了皇姑区当日早高峰时期路网的交通是较为拥堵的,且由北向南方向与由西向东方向的交通拥堵情况要比其他方向的更为严重,所辨识的关键路段数量较少,控制成本较低,且更多地分布在交通较为拥堵的路段上,表明本文提出的方法可以为有效找出交通高峰时期所需要控制的关键路段提供可行的参考。

本文只研究了对路网中关键路段进行辨识的方法,对于关键路段采取何种车流控制方法还有待进一步地研究,可作为下一步的研究方向。

#### 参考文献(References)

- [1] Qi H S, Hu X B. Monte Carlo Tree Search-based intersection signal optimization model with channelized section spillover[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106: 281-302.
- [2] Genders W, Razavi S. Asynchronous n-step Q-learning adaptive traffic signal control[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2019, 23(4): 319-331.
- [3] Ma W J, An K, Lo H K. Multi-stage stochastic program to optimize signal timings under coordinated adaptive control[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2016, 72: 342-359.
- [4] Masucci A P, Smith D, Crooks A, et al. Random planar graphs and the London street network[J]. *The European Physical Journal B*, 2009, 71(2): 259-271.
- [5] Sienkie Mawicz J, Holyst J A. Public transport systems in Poland: From Bialystok to Zielona Gora by bus and tram using universal statistics of complex networks[J]. *Acta Physica Polonica*, 2012, 36(5): 310-317.
- [6] Rinaldi M. Controllability of transportation networks[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 2018, 118: 381-406.
- [7] Yang X H, Chen G, Chen S Y, et al. Study on some bus transport networks in China with considering

spatial characteristics[J]. *Transportation Research—Part A: Policy and Practice*, 2014, 69: 1-10.

- [8] 李成兵, 张帅, 杨志成, 等. 蓄意攻击下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(2): 14-21.  
(Li C B, Zhang S, Yang Z C, et al. Invulnerability simulation in urban agglomeration passenger traffic network under targeted attacks[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(2): 14-21.)
- [9] Duan Y Y, Lu F. Robustness of city road networks at different granularities[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 411: 21-34.
- [10] 高德地图. 沈阳城市实时交通详情[EB/OL]. (2021-04-30)[2021-04-30]. <https://report.amap.com/detail.do?city=210100>.  
(Gaode Map. Shenyang city real-time traffic details [EB/OL]. (2021-04-30)[2021-04-30]. <https://report.amap.com/detail.do?city=210100>.)
- [11] Lin C T. Structural controllability[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(3): 201-208.
- [12] 潘玉剑, 李翔. 时效复杂网络结构可控性研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2015, 12(2): 23-31.  
(Pan Y J, Li X. On the structural controllability of temporal complex networks[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2015, 12(2): 23-31.)
- [13] Liu Y Y, Slotine J J, Barabási A L. Controllability of complex networks[J]. *Nature*, 2011, 473(7346): 167-173.
- [14] Pang S P, Wang W X, Hao F, et al. Universal framework for edge controllability of complex networks[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4224.
- [15] 叶焯星, 杨飞. 基于介数中心性的交通拥堵指数计算[J]. *测绘通报*, 2021(5): 86-90.  
(Ye Y X, Yang F. Calculation of traffic congestion index based on betweenness centrality[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(5): 86-90.)
- [16] Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955, 2(1/2): 83-97.
- [17] Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems[J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1957, 5(1): 32-38.

#### 作者简介

王立夫(1980—),男,副教授,博士,从事复杂网络、同步控制、能控性、交通网络等研究, E-mail: wlfkz@qq.com;

钟昊男(1995—),男,硕士生,从事复杂网络、能控性、交通网络的研究, E-mail: 957007188@qq.com;

郭戈(1972—),男,教授,博士生导师,从事网联车辆协同控制、智能交通系统、共享出行系统优化与控制等研究, E-mail: geguo@yeah.net.

(责任编辑: 齐 霖)