

# 基于 $K$ -短路径的路网关键路段集合的辨识与分析

张纪升<sup>1,2</sup>, 贾利民<sup>1</sup>, 牛树云<sup>2</sup>, 李宏海<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘 要:**为了提高高速公路网络化运营监管与公众服务的水平,需要准确可靠地辨识出综合多种因素的关键路段,采用交通分配理论及  $K$ -短路径算法研究了路网运行关键路段集的辨识问题。综合考虑路网结构、交通需求影响、出行行为特征等多方面因素,以系统内所有用户的旅行时间为交通网络性能度量指标,建立了路网运行关键路段评价模型;考虑多路段失效的联合效应,提出了路段集的重要度评估模型及其求解算法。该模型相对于传统的结构可靠性模型,考虑了出行者路径选择行为影响和多路段失效的联合效应,更符合路网运行管理的实际需求。研究结果表明:在相同交通需求的 OD 对之间,结构密度较低的区域,被选中为关键路段集的概率大;合理的  $K$  取值得到的关键路段集与全路网分配所得结果相近,可有效提升计算效率;多路段失效情况下,路段的联合效应明显。

**关键词:**交通工程;关键路段集辨识; $K$ -短路径;交通分配;公路网;路网性能损失

**中图分类号:**U491.14

**文献标志码:**A

## Identification and analysis of road network key segments set based on $K$ -shortest path

ZHANG Ji-sheng<sup>1,2</sup>, JIA Li-min<sup>1</sup>, NIU Shu-yun<sup>2</sup>, LI Hong-hai<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transportation, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to improve the level of highway network operation monitoring and public service, the key segments should be identified accurately and reliably based on comprehensive factors. This paper studies the key segments set identification problem by using traffic assignment theory and  $K$ -shortest path algorithm. The key segments evaluation model is proposed in this paper, which considers many aspects such as network structure, traffic demand influence, travel behavior and takes total travel time as network performance index. The importance degree evaluation model of key segments set and the solving algorithm are introduced with the consideration of the combined effect of multi-segment failure. Compared with traditional structure reliability model, the proposed model is more suitable for real network management because the route choice and the combined effect of multi-segment failure are taken into account. The results show that under the same traffic load, the segments with lower structural density

收稿日期:2014-12-16

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA112308)

作者简介:张纪升(1978-),男,山东安丘人,交通运输部公路科学研究院副研究员,北京交通大学工学博士研究生,

E-mail: zjs2107@163.com。

have higher probability to be selected as key segments; The results from reasonable  $K$  value assignment and whole network assignment are much close, which means  $K$ -shortest path algorithm could improve the computational efficiency; the segments combine effect is much clear under multi-segment failure condition. 6 tabs, 2 figs, 16 refs.

**Key words:** traffic engineering; key segments identification;  $K$ -shortest path; traffic assignment; road network; network performance loss

## 0 引言

中国高速公路经过20多年的发展迅速成网,截至2013年底,高速公路总里程达到 $10.4 \times 10^4$  km。与此同时,高速公路网面临的压力和挑战也在不断增加,经济社会发展对高速公路的需求爆发式增长、百姓安全、便捷机动化出行服务体验,极端恶劣气象频发等对区域路网的综合运输潜力、跨区域大范围服务体验以及面对突发状态的协同处置能力提出了更高的要求。全国高速公路网实行一体化、网络化、智能化监管与服务,面向路网运行管理层面的区域路网运行状态监测及监测体系的建设是一项重要的基础工作。

国内外针对基于路段重要度的关键路段辨识与分析方面已经开展了一些工作。文献[1]定义了评估重要度的指标,包括危险性、经济破坏度等;文献[2]构建了一个综合考虑网络流、路段能力和网络拓扑的方法;文献[3]提出了双层规划模型用以评估运输系统在危险疏散条件下的弱点;文献[4]提出了一个基于网络的变分不等式模型来评估网络节点或边的重要度;最近,文献[5]提出将旅行时间作为评价网络性能的指标,指出该指标能够体现网络的拥堵特性。早在20世纪90年代,文献[6]就对非负权网络中 $K$ -关键边和点进行了研究,并证明了其为NP难题;文献[7]对节点重要度的计算采用了因子分析法进行客观赋权以避免各指标主观赋权的随意性,采用 $K$ -Means聚类方法客观划分了城市节点重要度的类别;文献[8]通过分析各社会经济因素与公路客货运输的关联程度,找出关联度较大的因素,并根据关联度求解客观权重计算区域内各节点的重要度。

当前,大多数学者主要集中在路网结构可靠性以及路段重要度方面的研究,主要侧重在路网基础设施结构可靠性的表达,个别研究考虑了基于传统用户均衡模型的路径选择下的路段重要度研究。本文提出了基于 $K$ -短路径的路网运行关键监测点辨识技术。定义系统中所有用户的旅行时间为交通网

络性能指标的度量,进而通过计算 $K'$ 条路段构成的路段集合失效的情况下,交通网络性能指标的变化来判断该路段集合的重要度。不同于现有模型,该模型中每个OD对之间只选择最短的 $K$ 条路径作为有效路径集合,在此基础上进行用户均衡分配,从而提高了算法的效率,同时更加符合实际的路径选择行为。本文提出了模型算法,并通过算例对模型和算法进行了检验。

## 1 基于 $K$ -短路径的路网运行关键路段集评价模型

本文将行程时间作为权重,研究的公路网抽象成一个为非负权的有向网络 $G(N, A)$ ,其中 $N$ 为节点集合, $A$ 为路段集合; $G'(N', A')$ 为 $K'$ 条路段失效后遭到破坏的网络,其中 $N'$ 为剩余的节点集合, $A'$ 为剩余的路段集合。本文主要考虑基于路段重要度的路网运行关键监测点评估,路网中路段的重要性标准不仅要考虑路网的整体结构特性和路段特性,同时也要考虑路网上的交通运行量、交通运行状态,这是因为交通网络的性能本质上是由人的路径选择行为决定的。本文采用了基于 $K$ -短路径的用户均衡交通分配方法。同时,在文献[5]提出的方法中,为了考察交通网络中一条路段的重要度,采用用户总的旅行时间作为评价路段重要度的标准,首先需要计算这条路段有效和无效情况下的网络性能变化,从而可以进行对比度量。本文在该思路基础上,考虑多条路段失效情况下路网性能的变化,从而考虑多路段组合重要度,并据此进行重要路段集的选择。

因此,本文的方法包含2个过程的计算:①基于 $K$ -短路径的用户均衡过程;②基于均衡旅行时间的关键路段集辨识。

### 1.1 基于 $K$ -短路径的用户均衡模型

根据前面的说明,为了考虑交通网络的拥挤效应,需要将交通需求在网络上进行交通分配,从而确定网络上所有路段的交通流量。在仅仅考虑静态交通的条件下,网络上的交通流量可以通过用户均衡

模型来求取。本文通过用户均衡模型可以分别计算出被检测路段损毁之前和之后交通网络上的流量,进而可以计算出所有出行者的旅行时间,从而可以对检测路段的重要度进行评价。

在交通网络上,出行者通常会根据他们的经验来调整出行路径,直至达到最终稳定的平衡状态,这一平衡状态也就是经典的 Wardrop 第一原理所描述的平衡状态,也是交通分配中用户平衡(user equilibrium, UE)状态<sup>[9]</sup>。在这种状态下,每个 OD 对之间被使用的路径具有相等且最小的旅行时间,没有被使用的径路的旅行时间大于或等于该最小旅行时间。用户平衡状态可以写成

$$\begin{aligned} \min Z(x) &= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx \\ \text{s. t. } q_{rs} &= \sum_{k \in K_{rs}} (f_k^{rs}), \forall rs \in RS \\ f_k^{rs} &\geq 0, \forall k \in K_{rs}, \forall rs \in RS \\ x_a &= \sum_{rs \in RS} \sum_{k \in K_{rs}} (f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}), \forall a \in A \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $Z(x)$ 为路网中所有车辆总的旅行时间; $t_a$ 为路段  $a$  上的旅行时间变量, $a \in A$ ;  $q_{rs}$ 为起点  $r$  到终点  $s$  的所有 OD 流量; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为如果路段  $a$  在连接 OD 对  $rs$  之间的路径  $k$  上, $\delta_{a,k}^{rs}=1$ ,否则, $\delta_{a,k}^{rs}=0$ ;  $RS$ 为起点到终点(origin-destination, OD)对集合; $r$ 为起点; $s$ 为终点; $K_{rs}$ 为 OD 对  $rs$  之间的路径集合; $x_a$ 为路段  $a$  上的流量, $a \in A$ ;  $f_k^{rs}$ 为路径  $k$  上的流量, $k \in K_{rs}$ 。

不同于传统的用户均衡模型,假设每个 OD 对之间可选路径的最大数量为  $K$ ,且式中  $K_{rs} \leq K$ ,即任意 OD 对之间路径选择只能从  $K$ -短路径中选择。也就是说,这里的交通分配模型是基于  $K$ -短路径的用户均衡模型。

在模型中, $t_a(x)$ 是车辆在路段  $a$  上的旅行时间,通常是路段上交通流量的函数。本文采用经典的 BPR 函数描述路段的旅行时间,具体的表达式为

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left[ 1 + \beta \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^n \right] \quad (2)$$

式中: $t_a^0$ 为路段  $a$  上的自由流旅行时间, $a \in A$ ;  $c_a$ 为路段  $a$  的通行能力; $\beta, n$ 为模型参数,可以通过实测数据进行标定,本文采用最常用的参数值标定结果, $\beta$ 和  $n$ 分别取值为 0.15 和 4。

在实际交通中,当路段  $i$  遭到攻击后,其通行能力通常会有一定程度的减少,甚至彻底丧失通行能力。本文假定遭到攻击的路段  $i$  的通行能力是攻击之前通行能力的  $p(i)$  ( $0 \leq p(i) \leq 1$ ) 倍,即  $c_i' = p(i) \cdot$

$c_i$ 。特别的,当  $p(i) = 0$  时,说明路段遭到彻底破坏,通行能力为 0;而当  $p(i) = 1$  时,说明路段遭到的破坏很小,路段通行能力保持不变。

## 1.2 基于均衡交通费用的关键路段辨识模型

判断一条路段是否为关键监测点,通常可以定义为该条路段遭到破坏后,交通网络性能指标的变化。进一步,基于该定义,给出路段重要度指标  $D(i)$  的表达式为

$$D(i) = \frac{\Phi_G'(i) - \Phi_G(i)}{\Phi_G(i)} \quad (3)$$

式中: $\Phi_G(i)$ 、 $\Phi_G'(i)$ 分别为去除所选路段  $i$  之前和之后路段的性能度量指标。

对于交通网络,最著名的网络分配模型是用户均衡模型。在用户均衡的条件下,所有的出行者都不能通过单方面改变路径来提高系统效率。用户均衡分配模型已经被广泛应用于理论研究和交通规划的实践中,得到了充分的认可。为此,文献[5]采用用户均衡条件下的系统总旅行时间作为系统性能的度量。本文进一步考虑出行者路径选择行为的特征,考虑每个 OD 对之间只选择最短的  $k$  条路径作为有效路径集合,即用户不会绕道过远的路径,即使这条路径上有更短的旅行时间。在此基础上,同样采用系统总旅行时间作为交通网络性能的度量

$$\Phi_G = \sum_{rs \in RS} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} t_k^{rs} = \sum_{a \in A} x_a t_a \quad (4)$$

在对单一路段按照对网络性能的影响大小排序后,再组合选择  $K'$  个路段组成路段集,再次进行路网性能影响的评估,形成新的关键路段集排序,之后考虑经费约束按照字典序原则,从 2 个关键路段集中选取关键路段集。

## 1.3 基于均衡交通费用的关键路段集的辨识模型

通过以上分析,可以清晰认识路网中每条路段的重要度。但是,之前的重要度比较是在一个基本的假设下进行的,即系统中有且只有一条路段遭到破坏的假设条件。但是,在实际的交通网络中,可能会存在这样的情况:在之前的关键度评估中,2 个或多个重要度较弱的路段,其组合后构成的路段集合却会对路网产生更加重要的影响。因此,有必要对路段集合进行重要度评估。然而当前却很少有文献涉及这一问题。基于此,本文将对这一问题进行研究。

假设路网中有  $k'$  条路段遭到破坏,这些路段构成的路段集合为  $I_k' = \{i_1, i_2, \dots, i_{k'}\}$ 。遭到破坏后路网的性能指标,即此时系统总旅行时间为

$\Phi_G'(I_k')$ 。此时,路段集  $I_k'$  的在路网中的重要度指标为

$$D(i) = \frac{\Phi_G'(I_k') - \Phi_G(I_k')}{\Phi_G(I_k')} \quad (5)$$

式中: $\Phi_G(I_k')$ 与  $\Phi_G$  是相同的,可以通过式(4)进行计算。注意到,当  $k'=1$  时,该模型退化为式(3)的形式。

## 2 算法

### 2.1 基于K-短路径的路段重要度评估算法

为了检验模型的有效性和适用性,需要针对模型给出适合的算法,针对具体的交通实际计算得到交通网络中每条路段的重要度指标,从而判别关键监测点集。本文模型选取用户均衡条件下的系统总旅行时间作为重要度指标。首先需要计算道路系统没有遭到破坏时的总旅行时间;之后,在每步迭代中,首先需要选择遭到破坏的路段集合  $I_k'$ ,其中包含  $k'$  条路段集合的总数量为  $A'$ ;接着计算在其遭到攻击后的基于K-短路径的用户均衡状态,并将此结果与路段没有破坏之前的结果进行对比。持续这一过程,直到所有的路段集合都被选择。算法的具体流程如下。

步骤1,计算交通网络没有遭到破坏时所有用户的总旅行时间。

步骤2,初始化:初始化参数,设置迭代变量  $j=1$ (即其中一组路段集合  $I_k'(j)$  遭到破坏)。

步骤3,计算路段集合  $I_k'(j)$  遭到破坏(所有遭到破坏路段  $i_n(j) \in I_k'(j)$ ,  $n=1,2,\dots,k'$ ,通行能力为初始时的  $p(i_n(j))$ ,  $0 \leq p(i_n(j)) \leq 1$ )时所有用户的总旅行时间:①获取此时路网中所有OD对之间的K-短路径集合;②用户均衡解的获取,可以通过Frank-Wolfe等方法计算网络的平衡解(这些方法已经在许多文献中有描述,这里不再重述);③计算用户均衡下所有用户的总旅行时间。

步骤4,重要度评估:根据式(3)计算路段集合  $I_k'(j)$  的重要度指标;

步骤5,收敛条件:如果  $j=A'$ (所有路段都已经被遍历),终止计算;否则,  $j=j+1$ ,转到步骤3。

需要说明的是,该算法同时适合1.2节和1.3节的2种模型形式。当  $k'=1$  时,算法就可以认为是针对1.2节模型的算法;而当  $k'$  的取值更加广泛时,就可以认为是1.3节模型的算法。

### 2.2 K-短路径求解算法

K-短路径问题,多年来在各个领域进行了广泛

的研究,包括机器人路径规划、公路、电力线缆工程和网络连接路由等方面,形成了大量实用的计算方法。文献[10]构建了二进制顶点堆排序树模型,并为顶点赋权,运用Frederickson算法以在堆排序树中寻找最小K元素的方式获得优化的计算时间。文献[11]进行了K-短路无环路径问题的研究,考虑无环最短路径问题的排序问题,并认为该问题一般不满足最优化规则。国内外学者提出了基于Dijkstra算法的多标号K-短路径改进算法、无环路径改进算法、A\*算法、Floyd算法、Bellman-Ford算法、SPFA等算法来求解有向、无向图,有环、无环条件以及边权是否非负等各种条件下K-短路径的算法。近年来,随着计算智能技术的发展,学者们纷纷将蚁群算法、遗传算法等引入到K-短路径求解问题中。其中,基于Dijkstra算法的多标号K-短路径基础上的算法是最常用的算法。本文采用基于Dijkstra多目标无环K-短路径算法进行K-短路径的计算<sup>[12-13]</sup>,算法简要描述如下。

(1)给每个节点  $i$  以K个T标号和K个P标号值,  $T(k,i)$  表示从源节点  $s$  到节点  $i$  的第  $k$  短路径的路权的上界,是一种临时标号,  $P(k,i)$  表示从源节点  $s$  到节点  $i$  的第  $k$  短路径的路权,是永久路权,要求有:  $T(1,i) \leq T(2,i) \leq \dots \leq T(K,i)$ ,  $P(1,i) \leq P(2,i) \leq \dots \leq P(K,i)$ 。

(2)pre( $k,i$ )表示从源节点  $s$  到节点  $i$  的第  $k$  短路中的前驱节点标号。

(3)KS( $k,i$ )表示从源节点  $s$  到节点  $i$  的第  $k$  短路径来自于前序节点的最短路径序号(值域为:  $[1, K]$ )。

(4)Value( $k,i$ )表示从源节点  $s$  到  $i$  节点的第  $k$  短路径的总权值。算法按照Dijkstra算法不断修正各节点的K个T标号,将其中符合条件的最小的T标号修改为该节点相应的P标号,并进行是否有环(即判断是否同一节点在一个路径中出现2次,如果出现,则相应的T标号修改为 $\infty$ )的判断,直到所有的T标号都修改为P标号。

## 3 算例

为了检验模型和算法的有效性,本文给出具体算例。采用著名的Nguyen & Dupuis交通网络作为算例的基础网络<sup>[14]</sup>,如下页图1所示。该网络包含13个节点、19条路段、4个OD对,在所有路段都没有遭到破坏的情况下,4个OD对之间共有25条路径。4个OD之间的交通需求如下页表1所示。

与文献[5]中的设置相同,每条路段的自由流旅行时间为:路段 4 和路段 13 为 20,路段 18 为 30,其他路段为 10。所有路段的通行能力都为 2 000。

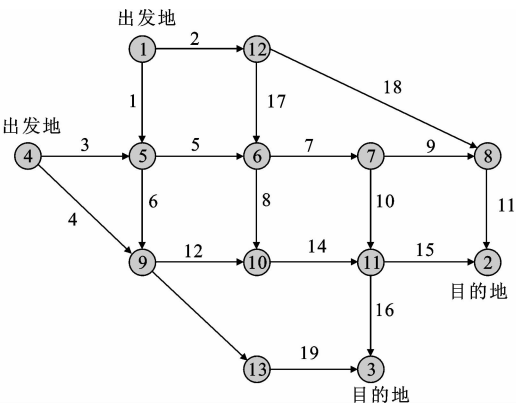


图1 Nguyen & dupuis 交通网络  
Fig.1 Nguyen & dupuis traffic networks

表 1 OD 需求  
Tab.1 OD demand

OD 矩阵		2	3
低需求	1	800	600
	4	600	800
中需求	1	1 200	800
	4	800	1 200
高需求	1	1 200	1 000
	4	1 000	1 200

为了深入理解交通需求对网络可靠度等性能的影响,本文分别选取了 3 个不同层次的交通需求量,即低、中、高 3 种交通需求,如下页表 2 所示。同时,不失一般性,针对每对交通需求,只取其中最短的 2 条路径作为可选路径进行交通分配。另外,根据失效路径集元素数量  $k'$  分别为 1 和 2 时,给出如下 2 个算例。

从表 2 可以看出,在低交通需求的时候,1 条路段的实效对整体交通网络性能的影响很小,所以表 2 中  $K$ -短路径与普通情况下,路段关键度的评价指标均趋近于 0(很小的数,经过四舍五入后取小数点后 2 位数时都为 0)。在中等交通需求的时候,路段 16 的重要度指标值最大,也就是说该条路段对整体路网的性能最为重要。在高需求的时候,路段 13 和路段 19 的重要度指标值最大。可以发现,在相同交通需求的 OD 对之间,路网密度越低的区域的路段重要度越大,这可以为检测器的布设提供理论参考。同时,对比  $K$ -短路径条件和普通条件下的结果,可以发现它们能够提供定性的相似结论,但是  $K$ -短路径条件下的结果对比更加强烈。也就是说,基于  $K$ -

短路径的模型方法能够更加明确的判断网络上的重要路段,这在交通实践中具有重要的现实意义<sup>[15]</sup>。

3.1 算例 1( $k'=1$ )

当路段  $i_n(j) \in I_k'(j)$  ( $n=1,2,\dots,k'$ ) 遭受部分破坏时,不失一般性,假设  $p(i_n(j))$  分别取 0.6,0.3 和 0.1,同样取最短路数量  $K=2$ 。从下页表 3 可以看出,当道路的破坏程度不同时,道路的重要度排序会发生明显的变化。比如当通行能力是破坏前的 0.1 倍时,路段 3 在路网中是最重要的路段,而在其他情况下却并非如此。这一结果是合理的,并且可以从驾驶人的路径选择行为进行解释。本文中,驾驶人选择路径的指标是旅行时间,当路段的破坏程度不同时,其对相关路径的旅行时间会产生重要的影响,也因此影响其在路网中关键度的评估。

3.2 算例 2( $k'=2$ )

与算例 1 相同,选取最短路的数量  $K=2$  进行交通分配,并且选取交通需求较高的情况。进而,考虑多个路段组成的路段集合  $i_n(j) \in I_k'(j)$  ( $n=1,2,\dots,k'$ ) 遭受部分破坏的情况。为了便于说明路段集合的影响,同时不失一般性,选择  $k'$  进行数值试验。数值试验的结果如下页表 4 所示。在表 4 中,考虑到集合的数量太多(17 个),所以仅给出路段集合重要度最大的 10 个路段集合。

对比表 3、表 4 可以看出,单独 1 条路段重要度的排序,并不能在路段集合重要度排序中表现出相应的影响力。例如,在表 3 中,当  $p(i_n(j))=0.3$  时,重要度最大的 2 条路段分别是路段 4 和路段 13,而表 4 中重要度最大的路段集合却是{13, 16}。显然最重要的路段 4 并不是最重要的路段集合{13, 16}中的元素。因此,路段的重要度与路段集合的重要度之间存在很大差异,需要进行分别研究。

3.3 算例 3(较大规模网络)

通过以上算例,可以发现路段集合重要度与单条路段重要度的评价存在较大差异。为了进一步验证此结论,需针对一个更大规模的道路网络进行测试。本文选择经典的 Sioux Falls 网络进行算例检验,该网络包含 24 个节点、76 条边、以及 528 个 OD 对,具体数据见文献[16]。

下页表 5、表 6 分别为路网中其中 1 条和 2 条路段遭受破坏时计算的路段和路段集合的关键度指标。从表 5 可以看出,路段 43 和路段 28 是路网中重要度最高的 2 条路段。而在表 6 中却发现,排序最重要的 20 个路段组合中,没有出现路段 43,而路段 28 只在排序第 15 的路段集合{27, 28}中出现。

表 2 Nguyen & Dupuis 交通网络中的关键路段评价

Tab. 2 Key segments evaluation of Nguyen & Dupuis traffic networks

%

路段	路段重要度评价					
	低需求		中需求		高需求	
	$K=2$	普通	$K=2$	普通	$K=2$	普通
1	0.00	0.00	1.50	1.50	16.25	16.25
2	0.00	0.00	1.50	1.50	16.26	16.26
3	0.00	0.00	3.00	3.00	32.50	32.50
4	0.00	0.00	1.50	1.50	16.25	16.25
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	1.50	1.50	16.26	16.26
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	1.51	1.50	8 609 332.76	16.29
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
15	0.00	0.00	1.50	1.50	16.25	16.25
16	0.00	0.00	4.50	4.50	48.76	48.76
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
19	0.00	0.00	1.51	1.50	8 609 332.76	16.29

表 3 不同关键路段破坏度下 Nguyen & Dupuis 网络中的关键路段评价

Tab. 3 Key segment evaluation of Nguyen & Dupuis under condition of different segment damage

%

路段	路段重要度评价			
	高需求, $K=2$			
	$p(i_n(j))=0.6$	$p(i_n(j))=0.3$	$p(i_n(j))=0.1$	$p(i_n(j))=0$
1	0	0.02	0.15	16.25
2	0	0.23	0.17	16.26
3	0	0.04	6.41	32.50
4	0	0.79	0.19	16.25
5	0	0.01	0	0.00
6	0	0	0.01	0.00
7	0.01	0.13	0	0.03
8	0	0	0	0.00
9	0	0	0.16	0.00
10	0	0.12	0.06	0.00
11	0	0.41	0.38	16.26
12	0	0	0.09	0.00
13	0	0.46	0.20	8 609 332.76
14	0	0	0.04	0.04
15	0	0.08	0.16	16.25
16	0	0.24	0.41	48.76
17	0	0	0	0.00
18	0	0	0	0.00
19	0	0.24	0.23	8 609 332.76

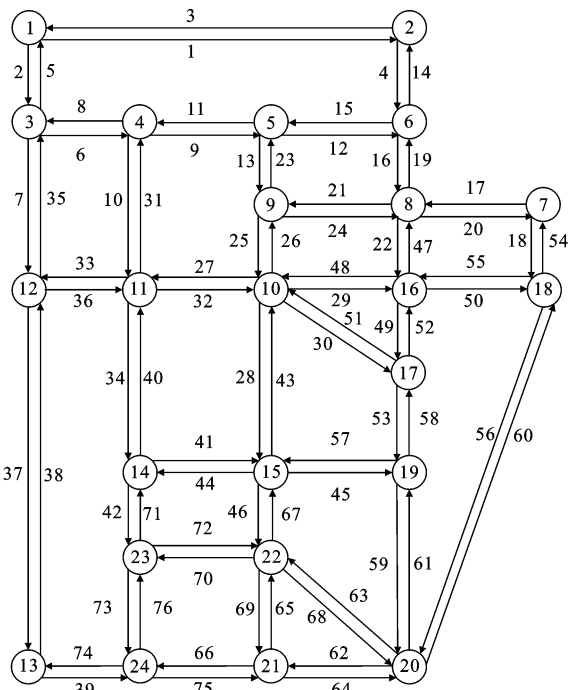


图 2 Sioux Falls 交通网络

Fig. 2 Sioux Falls traffic networks

综上,可以得出与算例 2 相似的结论,即路段的重要度与路段集合的重要度之间存在差异,需要分别进行研究。本文提出的关键路段集辨识模型可有效体现多路段受损情况下的联合效应,辨识出对路

表 4 路段集合元素数量  $k'=2$  时 Nguyen & Dupuis 网络中路段集合的重要度评价

Tab. 4 Importance degree evaluation of segment set when the number of segment set  $k'=2$

路段重要度评价						
排序	高需求, $K=2$					
	$p(i_n(j))=0.6$		$p(i_n(j))=0.3$		$p(i_n(j))=0.1$	
	路段集合	重要度/%	路段集合	重要度/%	路段集合	重要度/%
1	13,16	0.48	13,16	2 657 608.77	1,2	$6.64\times10^{20}$
2	3,4	0.48	11,15	2 140 151.40	3,4	$1.38\times10^{19}$
3	16,19	0.47	3,4	2 114 837.22	13,16	$1.38\times10^{19}$
4	11,15	0.28	16,19	1 982 918.74	16,19	$1.34\times10^{19}$
5	1,2	0.17	1,2	1 807 768.63	11,15	$4.90\times10^{16}$
6	2,14	0.06	7,14	33.27	3,12	$3.51\times10^{11}$
7	13,14	0.06	7,13	12.47	3,14	$3.49\times10^{11}$
8	7,13	0.06	13,14	11.51	5,14	$3.43\times10^{11}$
9	7,19	0.06	10,14	11.36	6,16	$2.43\times10^{11}$
10	7,14	0.04	5,12	11.12	3,15	$6.31\times10^{11}$

网运行影响较大的关键路段集合。

表 5 不同关键路段破坏下 Sioux Falls 网络中的关键路段评价

Tab. 5 Key segment evaluation of Sioux Falls under condition of different segment damage

路段	路段重要度	路段	路段重要度	路段	路段重要度
1	0.07	27	7.77	53	3.57
2	0.75	28	13.72	54	2.46
3	0.08	29	5.96	55	2.99
4	1.25	30	3.79	56	6.65
5	0.76	31	1.50	57	6.12
6	3.30	32	7.63	58	3.58
7	1.30	33	2.04	59	2.17
8	3.31	34	4.64	60	6.64
9	4.64	35	1.31	61	2.19
10	1.47	36	2.05	62	1.51
11	4.71	37	3.01	63	1.96
12	1.79	38	3.05	64	1.48
13	6.61	39	7.37	65	2.22
14	1.26	40	4.65	66	3.74
15	1.79	41	3.02	67	7.71
16	8.44	42	2.42	68	1.94
17	4.27	43	13.90	69	2.26
18	2.43	44	3.05	70	3.09
19	8.53	45	6.10	71	2.41
20	4.21	46	7.70	72	3.05
21	2.00	47	1.55	73	1.66
22	1.53	48	6.03	74	7.39
23	6.70	49	4.93	75	3.65
24	1.96	50	2.96	76	1.65
25	8.69	51	3.82		
26	8.84	52	4.93		

表 6 路段集合元素数量  $k'=2$  时 Sioux Falls 网络中路段集合的重要度评价

Tab. 6 Importance degree evaluation of segment set when the number of segment set  $k'=2$

排序	路段集合	重要度/%	排序	路段集合	重要度/%
1	22,26	46.53	11	25,26	34.09
2	12,31	45.93	12	24,31	33.52
3	42,59	45.70	13	42,47	33.51
4	27,55	45.27	14	18,42	32.88
5	18,22	35.44	15	27,28	32.73
6	12,15	35.03	16	15,27	32.34
7	42,73	34.92	17	10,26	31.93
8	27,38	34.84	18	51,52	31.78
9	39,42	34.82	19	48,57	31.68
10	27,33	34.57	20	8,31	31.05

## 4 结 语

(1)将系统内所有用户的旅行时间作为交通网络性能度量指标,基于交通分配理论及  $K$ -短路径方法,建立了路网运行关键路段集的辨识模型,该模型集成了管理者对保通(最短路径分配)及服务(有限可选路径分配)的管理和服务需求。

(2)提出了有效的模型求解算法,并利用经典的 Nguyen&Dupuis 网络和 Sioux Falls 网络对构建的关键路段集辨识模型的可行性进行了验证,结果表明:①单一路段的重要度与路段集合的重要度之间的差异显著,模型可有效体现多路段受损情况下的联合效应,辨识出对路网运行影响较大的关键路段集合;②在相同交通需求的 OD 对之间,路网密度越低的区域的失效路段组成的路段集合的重要度越大;③合理的  $K$  取值得到的关键路段集与全网网随

机分配所得结果相近,即出行者通常会选择有限的可行路径出行,提出的模型可有效提升计算效率。

(3)相对于传统的路网结构可靠性模型,该模型考虑了出行者路径选择行为影响和多路段失效的联合效应,其结果可为交通管理者拥堵防控策略的制定提供理论支撑,更符合路网运行管理的实际需求。

(4)针对大规模路网, $K$ -短路径中  $K$  的取值方法,以及模型的快速求解算法研究将是后续研究的重点。

## 参考文献:

## References:

- [1] Ham D B, Lockwood S. National needs assessment for ensuring transportation infrastructure security[R]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
- [2] Scott D M, Novak D C, Lisa A H, et al. Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks[J]. Journal of Transport Geography, 2006, 14(3): 215-227.
- [3] Murray-Tuite P M. Identification of vulnerable transportation infrastructure and household decision making under emergency evacuation conditions[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2003.
- [4] Chen A, Kongsomsaksakul S, Zhou Z. Assessing network vulnerability using a combined travel demand model [C]//TRB. Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2007: 2559-2577.
- [5] Ukkusuri S V, Yushimito W F. A methodology to assess the criticality of highway transportation networks [J]. Journal of Transportation Security, 2009, 2(1/2): 29-46.
- [6] Bar-Noy A, Khuller S, Schieber B. The complexity of finding most vital arcs and nodes[R]. Maryland: University of Maryland, 1995.
- [7] 宋新生,王啸啸,李爱增,等.城市群区域公路网节点重要度评估方法研究[J].交通运输系统工程与信息, 2011, 11(2): 84-90.  
SONG Xin-Sheng, WANG Xiao-xiao, LI Ai-zeng, et al. Node importance evaluation method for highway network of urban agglomeration[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(2): 84-90. (in Chinese)
- [8] 王旭,刘世铎,贾红兵.基于灰色关联分析的公路网节点重要度测算方法研究[J].交通标准化, 2010(8): 91-95.  
WANG Xu, LIU Shi-duo, JIA Hong-bing. Study on calculation of node importance in the highway network based on the gray relational analysis[J]. Transport Standardization, 2010(8): 91-95. (in Chinese)
- [9] Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [R]. New Jersey: Prentice Hall, 1985.
- [10] Eppstein D. Finding the  $k$  shortest paths[C]//IEEE. 2013 IEEE 54th Symposium on Foundations of Computer Science. Santa Fe: IEEE Computer Society Press, 1994: 154-156.
- [11] Azevedo J D, Madeira J J E R S., Martins E Q V, et al. A computational improvement for a shortest paths ranking algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 73(1): 188-191.
- [12] 赵见.求解无环  $K$  短路径的 Dijkstra 算法[J].淮阴师范学院学报:自然科学, 2012, 11(1): 8-12.  
ZHAO Jian. Dijkstra algorithm for acyclic  $K$  shortest path[J]. Journal of Huaiyin Teachers College: Natural Science, 2012, 11(1): 8-12. (in Chinese)
- [13] 戴树贵,陈文兰.一个求解  $K$  短路径实用算法[J].计算机工程与应用, 2005, 36(6): 63-65.  
DAI Shu-gui, CHEN Wen-lan. A practical algorithm for the  $K$  shortest-path problem[J]. Computer Engineering and Application, 2005, 36(6): 63-65. (in Chinese)
- [14] Nguyen S, Dupuis C. An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs [J]. Transportation Science, 1984, 18(2): 185-202.
- [15] Hong K L, Tung Y K. Network with degradable links: capacity analysis and design[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(4): 345-363.
- [16] Suwansirikul C, Friesz T L, Tobin R L. Equilibrium decomposed optimization: a heuristic for the continuous equilibrium network design problem[J]. Transportation Science, 1987, 21(4): 254-263.