

文章编号: 2095-2163(2020)12-0069-07

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

基于中断概率模型的城市路网关键路径辨识

姚 佼, 王品乘, 韦 钰, 李宇航, 鲍雨婕, 王 银

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 通勤交通行驶路径的选择对于减少其在途行程时间, 实现城市路网的“畅通工程”影响显著。为了对路网内的路径进行有针对性的优化控制, 需首先对其关键路径进行辨识。本文基于贝叶斯网络对城市路网中各路段的中断概率进行分析, 进而利用路网效能建立中断影响模型, 确定各路段的初始关键度。在此基础上, 分析各路段在路网内最小路集中出现的频次, 作为路段关键度的修正依据。以路段关键度为基础, 计算路径关键度, 完成关键路径的有效辨识。最后, 以上海市黄浦区相关路网为例, 对模型进行验证。结果表明, 所得关键路径关键度为 0.12, 高于均值 54%。相比于依赖交通流量、饱和度等单一指标的研究体系, 其结果分布较集中, 并考虑了路段间的关联性及时机影响性, 提高了辨识的可靠性和准确性, 可很好应用于后续的路径信号协调控制。

关键词: 城市路网; 关键路径; 贝叶斯网络; 路网效能

Interrupt Probability Model Based Critical Route Identification of Urban Road Network

YAO Jiao, WANG Pincheng, WEI Yu, LI Yuhang, BAO Yujie, WANG Yin

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] Route selection of commuting traffic is significantly influence on reduction of its travel time on the way, and realization of smooth traffic project. In order to optimize the route control in the road network, the critical route should be identified firstly. Bayesian network based interruption probability of each road section in urban road network were analyzed, and furthermore, the model of interrupt probability was proposed with road network efficiency, and the initial critical degree of each road section was determined. Base on the work above, the occurrence frequency of every road section in minimal route sets of road network was analyzed, which was used as the modification base of critical degree of each road section. Based on critical degree of road section, the route criticality was calculated, and the identification work of critical route was finished. Finally, road network in Huangpu District, Shanghai was selected as case study to verify the model. The results show that the critical degree of route obtained is 0.12, 54% higher than the average value. Compared with the single-index system, such as traffic flow and saturation, the distribution of the results is more concentrated, and the correlation and random influence between road sections are considered, which improves the reliability of identification, and can be used in the following signal control of route coordination.

[Key words] Urban traffic; Critical route; Bayesian network; Road network efficiency

0 引言

路网是城市的重要基础设施之一,也是城市交通的生命线。路网效能的降低,会对整个城市交通系统的运行造成影响,其服务质量降低会给社会的经济带来负面影响^[1]。路网中节点和节点间的路段是其重要组成元素,路网可靠性由各节点的稳定性及连接节点的路段稳定性决定。各起讫点 OD (Origin-Destination) 对间的路径,承载城市交通的主要交通荷载,其中断会造成 OD 对间通行能力的

急剧下降,进而对整个路网的效能造成严重影响^[2]。对路网中关键路径的快速有效辨识可以抓住主要矛盾,为后续的交通管理与控制提供依据。对于预防和缓解交通拥挤及其扩散亦有一定的指导意义^[2],亦对应急资源调配、调度的路径辨识具有一定的参考价值。

目前国内外相关研究主要从路网可靠度的角度出发,研究路网中的关键路段辨识。路网可靠度的概念最早由日本学者 Mine H 等提出,评价交通网络节点间连通的概率^[3];后来, Jenelius E 等人从道

基金项目: 2020 年度上海市社科规划课题(2020BGL013)。

作者简介: 姚 佼(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向:智能交通;王品乘(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:智能交通、信号控制;韦 钰(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:智能交通;李宇航(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:智能交通;鲍雨婕(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:智能交通。

通讯作者: 王品乘 Email: sav456@163.com

收稿日期: 2020-10-12

路网络的脆弱性角度出发,针对道路网络的投资、运营及维护,提出了一种网络链接评估方法^[4];针对路网内的路段辨识,李彦瑾等人构建面向广义阻抗的 GERT(Graph Evaluation and Review Technique)网络模型,得到突发情况下路网内的关键路段^[5];城市交通领域逐渐利用关键度这一量化指标来进行关键路段辨识,张建旭等将关键度的计算用路段薄弱性指标与重要性指标的乘积来表示^[6];左志、潘晓锋等人基于路段通行能力的退化,利用逆向检测法对路段及节点的重要性指标进行了分析研究^[7]。贝叶斯网络是一种数学概率模型,可以很好的运用于实际生活中。Yu D C 等首先将其运用到电力系统的可靠性评估案例中^[8]; Li X 利用贝叶斯网络计算后验概率的性质,计算了加工系统分析中不确定指标对的影响值^[9];尹洪英等人将贝叶斯网络模型引入到城市路网的研究中,将路段视为贝叶斯网络的根节点^[10];刘异则将贝叶斯网络运用至道路拥堵的概率预测中^[11]。贝叶斯网络的概率分布描述可以很好的运用于各路段中,用以表示其道路拥堵失效的概率。

上述研究成果主要是针对路段的辨识研究,而国内外对于城市路网内关键路径的辨识体系仍有待完善。存在一定的算法研究,但缺乏一个辨识体系。Sahoo R R 和 Ray M 通过粒子群算法对适应度函数进行改进,提出了新的关键路径求解算法^[12];李岩等人针对关联交叉口群各交叉口关联性强的特点,利用系统聚类方法对交叉口群的关键路径进行了辨识^[13]。本文基于关键度这一指标,引入最小路集的概念,在计算路段初始关键度的基础上,针对其在 OD 对间的最小路集中出现的频次进行修正,并针对各路段在路径中的关系进行路径关键度的计算,完成城市路网内关键路径的辨识。最后,通过对上海市黄浦区实际路网进行相关的案例分析与验证。该方法与传统关键路径辨识方法相比,较为全面、可靠,且克服了采用单一指标进行识别的局限性,增加了路段之间的关联性影响随机性,具有较强的实用性。

1 路段中断概率模型

路段的重要程度是进行关键路径辨识的重要依据,通过路段中断概率模型及路段中断影响模型得出路段的薄弱性指标和重要性指标,并据此得到各路段的初始关键度,作为城市路网关键路径辨识研究的重要参数。

1.1 基于贝叶斯网络的路段中断概率模型

贝叶斯网络(Bayesian Networks)是基于概率分

析和图论的一种不确定性知识表达和推理的模型,其是一个带有条件概率的有向无环图,由代表变量的节点及连接这些节点的有向边构成,其节点代表随机变量,节点间的有向弧代表随机变量间的条件依赖关系(即影响概率),弧的方向代表 2 个节点之间原因结果的影响关系,通过图形表达不确定性^[8],该特性可以很好的用于描述各路段中断不确定性的表达。贝叶斯网络具有双向推导性,不仅可以由先验概率计算出后验概率,即已知条件求结果,同时也可以根据后验概率推算出先验概率,即已知结果推条件。

根据贝叶斯网络,给出下列基本条件概率计算公式(1)^[8]:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

其中: $P(A|B)$ 表示后验概率; $P(B|A)$ 表示似然率; $P(A)$ 表示先验概率; $P(B)$ 表示全概率。

假定存在一个变量 A 存在 a_1, a_2, \dots, a_n 共 n 个状态,那么全概率公式(2)可以表示为:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A = a_i)P(A = a_i) \quad (2)$$

据此可以进一步根据式(1)计算出后验概率。

将城市路网视作一个系统,而路网中各条路段则可以视为系统的各个部件,部件的故障会引起系统的故障,而根据后验概率可以推算出系统故障时各个部件故障的概率。当模型用于路段时其含义为:当道路网络通行故障时,该路段中断的后验概率。针对所研究的路网问题,构建基于贝叶斯网络的路段中断概率模型,具体思路如图 1 所示。基于贝叶斯网络的路段中断概率模型的具体步骤如下:

(1)根据路网拓扑结构确定路网的 OD 对、交叉口节点及车流方向,并将各条路段定义为贝叶斯网络的根节点,由各条路段所构成的集合即为所研究的节点变量集;

(2)根据 OD 对间路段的关联性建立最小路集,从而根据最小路集建立贝叶斯网络模型,根据贝叶斯网络结构生成条件概率表;

(3)根据专家的经验 and 历史数据得到每个路段的先验中断概率,路段没有概率差异时,可以用一个相等的概率代替先验概率^[10]。由此可以计算出各个节点的概率分布及顶节点中断的概率及路网故障的概率;

(4)假定路网失效时,根据贝叶斯网络模型计算各个根节点后验条件概率即为所需的路段中断概

率,其值可以表示该路段在路网中的重要程度。

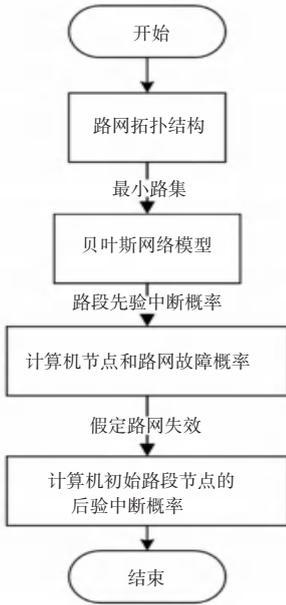


图 1 基于贝叶斯网络的路段中断概率模型研究思路

Fig. 1 Research ideas of link interruption probability model based on Bayesian network

1.2 基于路网效能的路段中断影响模型

路网的效能往往受到路网中关键路段的影响,而关键路段的功能失效与否对路网全局连通性、鲁棒性和效能有重大影响的路段^[14]。

路网效能是路网中所有节点间最短路径的效能之和与节点间最短路径数的比值,即整个路网最短路径的效能之和的平均值^[7],体现了整个路网的运输效能,其计算公式(3)如下:

$$E_R = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{\min(C_{ij})}{d_{ij}} \quad (3)$$

其中: E_R 表示路网 R 的路网效能; N 表示路网中的节点总数; $\min(C_{ij})$ 表示节点 i 和节点 j 之间的路径通行能力(路径通行能力定义为路径内所有路段的通行能力中的最小值)(pcu/h); d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的最短路径长度(m)。

由于道路网络是一个完整的有机体,各节点、路段间都存在着相互作用的关系,因此,单凭路网效能不能够对各条路段的关键程度进行评价分析,故利用中断检测法分析各路段在路网内的重要程度。

中断检测法的核心思想在于假定路网内的某一条路段由于某特殊情况发生中断失效,求得该路段失效后的路网效能,并与初始路网效能比,求出路网效能的变化率,最终根据变化率值判断路段的关键程度。

路网效能变化率公式(4)如下:

$$L_i = \frac{E_R - E_i}{E_R} \times 100\% \quad (4)$$

其中, i 为路段编号; L_i 为对应路段的路网效能损失率; E_i 为路网效能的退化值。

据此,提出了路段中断影响模型的研究思路,如图 2 所示。基于路网效能的路段中断影响模型的具体步骤如下:

- (1) 计算路网的初始效能;
- (2) 选取路段 i , 假定其路段中断,通行能力设为退化值;
- (3) 计算各路段通行能力退化后的路网效能;
- (4) 计算各路段中断后的路网效能损失率;

得到各路段的路网效能损失率以后,可将其理解为路段中断影响值,根据其值的大小可以判断该路段在路网中的重要程度。

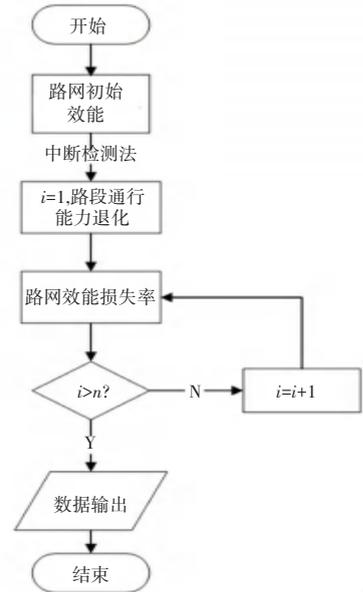


图 2 基于路网效能的路段中断影响模型研究思路

Fig. 2 Research ideas of road disruption impact model based on road network efficiency

2 基于中断概率影响模型的路网关键路径辨识

2.1 基于中断概率影响模型的路段关键度计算

根据路段中断概率模型和路段中断影响模型,得到路段中断的概率值和影响值,可以作为判断关键路段的依据。根据关键路段的定义,关键路段的辨识要从路段失效的概率和路段失效后产生的影响程度两个方面进行考虑,所以关键路段辨识中的指标要能综合体现路段被破坏的可能性和破坏后的影响程度^[2]。

定义路段关键度作为确定关键路段的评价指标,路段关键度为路段中断概率值和路段中断影响

值的乘积,即路段中断的可能性和中断后的影响程度的乘积,关键度越大,则说明路段越薄弱^[6]。具体公式(5)如下:

$$K_i^0 = P_i \times L_i \quad (5)$$

其中: K_i^0 为路段关键度; P_i 为路段中断概率值; L_i 为路段中断影响值。

通过计算可以得到路网内各条路段的关键度,进而可依据关键度来进行关键路段的辨识。当然,在涉及到关键路径辨识时,该关键度还需要进行修正计算。

2.2 路网关键路径辨识

在城市交叉口群中,关键路径的辨识研究尤为重要。传统的路径检测辨识方法容易受到人工、道路或自然条件这些外界因素的干扰,且评价指标单一。因此,两个模型得到的路段关键度这一指标,从路段的角度出发,至路段所处的路径,并结合路径在路网中的关联性来进行关键路径的辨识,具体研究思路如图3所示。据此关键路径辨识过程分为以下步骤:

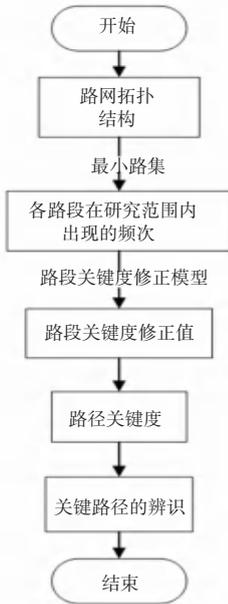


图3 基于关键度的路网关键路径辨识研究思路

Fig. 3 Critical path identification of road network based on criticality

2.2.1 根据路网拓扑结构,根据 OD 对间路段的关联性建立最小路集

在网络结构图中,路集是指两节点内所有弧序列的集合;若除去其中任意一条弧后,该路集不成立,那么就称其为最小路集。

将其思想用至路网拓扑结构中,节点可以视作路网的 OD 对,弧序列则指路段,路集指的是一对

OD 对内所有路段的集合,一个最小路集则为一 OD 对间的一条路径。因此,在研究 OD 对范围内,最小路集数即为可连通该 OD 对路径数。

2.2.2 在所研究的 OD 对范围内,统计各路段在最小路集中出现的频次

将 OD 对状态分为“连通”和“不连通”两种。路网上任一 OD 对之间,如果存在至少一条路径,则认为该 OD 对连通,否则认为不连通^[1]。若路网内任一 OD 对状态为“不连通”,则路网失效。

因此,在进行路网关键路径辨识时,考虑从 OD 对出发,研究 OD 对内各路径的关联性,而路径是由路段组成的,因而用最小路集的形式进行识别研究。

2.2.3 根据路段关键度修正公式,得到路段关键度的修正值

在涉及路径辨识时,路段之间的关联性将更加复杂,因此需要增加参数指标进行关键度修正。

修正公式可以借鉴经典 BPR 函数的形式,具体如公式(6)^[15]:

$$K_i^1 = K_i^0 \frac{\xi}{\xi + \frac{V}{C}} + \frac{\lambda_i - 1}{\sum N_j} \frac{\xi}{\xi + \frac{V}{C}} \quad (6)$$

其中: K_i^1 表示第 i 条路段的关键度修正值; K_i^0 表示第 i 条路段关键度初始值; λ_i 表示第 i 条路段在最小路集中出现的频次(若大于 1,则需要进行关键度修正); N_j 表示第 j 个 OD 对间的总路径数; $\frac{V}{C}$ 表示路段饱和度,即流量与通行能力的比值; ξ 表示路网状态系数,根据实际情况进行取值。

2.2.4 路径关键度的求解与关键路径的辨识

在得到了路径中各路段关键度的修正值之后,路径的关键度 C 可以定义为各路段关键度的均值,公式(7)如下:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n K_i^1}{n} \quad (7)$$

式中: C_j 为第 j 条路径的关键度, n 为 OD 对间的路径数。

在得到各路径关键度后,可以根据其值进行路网内关键路径的辨识。

3 案例分析与验证

根据前述模型和路网内关键路径的辨识过程,选取上海市中心城区黄浦区的典型路网,根据现有数据及调查数据对模型进行验证分析。

3.1 研究路网选取及数据采集

本次研究以上海市黄浦区西藏南路、淮海中路

区域路网进行研究,研究区域如图 4 所示,共有 12 个节点交叉口,16 条路段。根据区域结构,对各路段进行编号,建立路网拓扑结构,如图 5 所示。由此可见,研究路网中 2 个起始点,2 个终到点,总 O-D 对数为 4。选取 2019 年 5 月 8 日(周三)至 2019 年 5 月 10 日(周五)工作日高峰时段(17:30-18:30),

调查流量、通行能力等模型所需基础数据,见表 1。

3.2 路段关键度的计算

依据所建立的研究区域网络拓扑结构(图 5),根据贝叶斯网络模型计算路段的中断概率值,利用路网效能变化率计算中断影响值,并计算路段初始关键度,结果见表 2。

表 1 研究路网各路段参数

Tab. 1 Study the parameters of each section in the road network

路段编号	路段长度/m	路段流量/pcu	通行能力/pcu	路段编号	路段长度/m	路段流量/pcu	通行能力/pcu
R1	118	303	694	R9	91	1930	2 688
R2	91	936	1548	R10	175	202	536
R3	89	230	523	R11	268	207	1 011
R4	76	179	389	R12	150	1022	2 406
R5	133	72	429	R13	134	1483	2 017
R6	86	317	541	R14	115	3493	5 289
R7	71	1 123	1 707	R15	143	695	1 008
R8	158	1 426	3 227	R16	123	216	605

表 2 路段中断概率、中断影响及关键度

Tab. 2 The probability, impact and criticality of road interruption

路段编号	中断概率值	中断影响值	初始路段关键度 (10^{-3})	路段编号	中断概率值	中断影响值	初始路段关键度 (10^{-3})
R1	0.159	0.521	82.84	R9	0.054	0.061	3.29
R2	0.132	0.521	68.77	R10	0.238	0.530	126.14
R3	0.063	0.287	18.08	R11	0.344	0.266	91.5
R4	0.040	0.139	5.56	R12	0.071	0.326	23.15
R5	0.079	0.152	12.01	R13	0.185	0.582	107.67
R6	0.106	0.343	36.36	R14	0.060	0.157	9.42
R7	0.043	0.231	9.93	R15	0.070	0.157	10.99
R8	0.094	0.191	17.95	R16	0.060	0.303	18.18

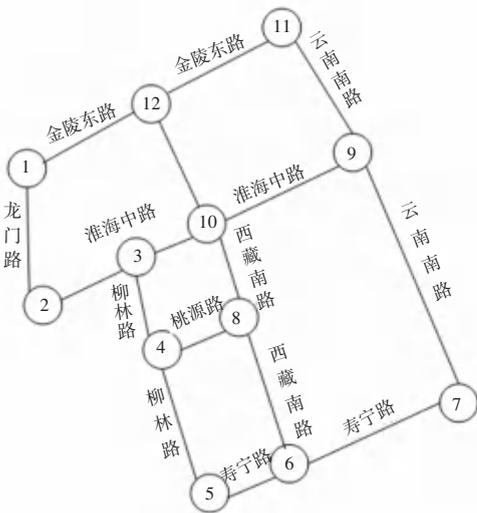


图 4 研究案例区域路网图

Fig. 4 Road network map of study case area

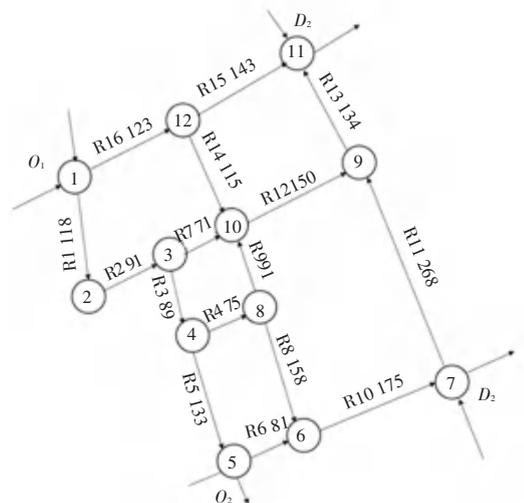


图 5 研究路网网络拓扑结构图

Fig. 5 Study the topological structure of road network

将各 OD 对间的路径用最小路集的形式表示如下:

O_1D_1 : (R16, R15), (R16, R14, R12, R13), (R1, R2, R7, R12, R13), (R1, R2, R3, R5, R6, R10, R11, R13), (R1, R2, R3, R4, R8, R10, R11, R13)

O_1D_2 : (R1, R2, R3, R5, R6, R10), (R1, R2, R3, R4, R8, R10), (R1, R2, R7, R9, R8, R10)

O_2D_1 : (R6, R10, R11, R13)

O_2D_2 : (R6, R10)

根据各个最小路集的形式,建立贝叶斯网络图,每个最小路集用字母 A 表示一条路径如图 6 所示。

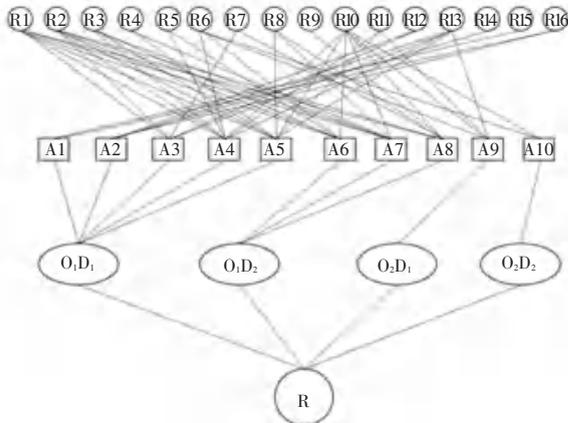


图 6 研究区域贝叶斯网络结构模型图

Fig. 6 Study the structure model of regional Bayesian network

由表 2 可得:路段 R10 的关键度最高约 126.14×10^{-3} ,可初步判定为路网内的关键路段,该路段中断时会对路网造成较大的影响。各路段关键度分布图如图 7 所示。

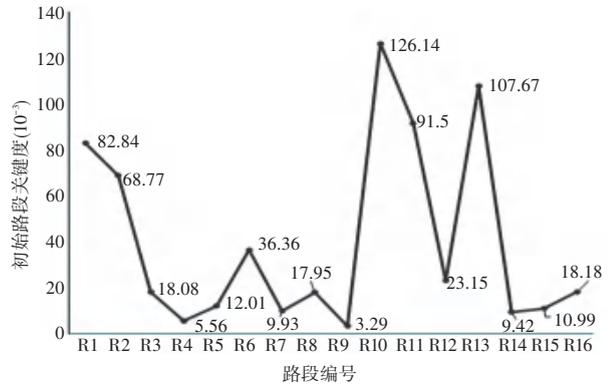


图 7 路段关键度分布

Fig. 7 Distribution of section criticality

3.3 路径关键度的计算

根据路网的拓扑结构图,统计各路段在最小路集中的频次 λ ,若 $\lambda > 1$,则需要对路段关键度值的修正,统计该路段所涉及的 OD 对内的总路径数。经统计,共有 13 条路段需要进行关键度修正,分别为 R1-R8、R10-R13 以及 R16。计算各路段关键度修正值见表 3。

表 3 路段关键度修正前后对比

Tab. 3 Section criticality correction

路段编号	初始路段关键度 (10^{-3})	修正路段关键度 (10^{-3})	路段编号	初始路段关键度 (10^{-3})	修正路段关键度 (10^{-3})
R1	82.84	109.52	R9	3.29	3.29
R2	68.77	97.51	R10	126.14	155.03
R3	18.08	21.60	R11	91.5	100.08
R4	5.56	5.93	R12	23.15	25.48
R5	12.01	12.37	R13	107.67	163.79
R6	36.36	43.47	R14	9.42	9.42
R7	9.93	10.82	R15	10.99	10.99
R8	17.95	20.29	R16	18.18	19.78

由表 3 可见,修正前路段关键度最高的三条路段依次为:R10、R13、R11;修正后路段关键度最高的三条路段依次为:R13、R10、R1。根据各路段的关键度修正值进行路径关键度的计算。得到路径 A1-A10 的路径关键度,见表 4。

计算结果可得,路网内的路径平均关键度约为 0.074,辨识出 A9 为关键路径,路线为 (R6→R10→R11→R13);其关键度为 0.12,高于平均值 54.9%。其中路段 R10 和 R11 均为路网中的重要路段,其路

表 4 路网中各路径关键度计算结果

Tab. 4 Route criticality

路段编号	路径关键度	路段编号	路径关键度
A1	0.015 39	A6	0.073 25
A2	0.054 62	A7	0.068 31
A3	0.081 42	A8	0.066 08
A4	0.087 92	A9	0.115 59
A5	0.084 22	A10	0.099 25