

The Analysis on Beijing Expressway Congestion Time-space Model Based on Interpretive Structural Model

Zhuo Wang[†], He Mao

Beijing Jiao tong University, School of Traffic and Transportation, Beijing 100044, China

[†]Email: wangzhuo@jtys.bjtu.edu.cn

Abstract

The congestion classification evaluation standard of Beijing expressway is proposed based on the on-time transportation flow data in this paper, the time-space model matrix is found according to the time-space characteristics of transportation flow data, and the congestion time-space model matrix are obtained according to different congestion level threshold, and their reachable matrix are calculated out. The interpretive structural model method is adopted to partition the reachable matrix, the congestion time-space structure models are obtained under different threshold, finally, the analysis is carried out for the structure model and the directed and undirected factors are obtained. The study of this paper provide an effective way for analyzing and preventing for road congestion, and provide refer value for the road manager.

Keywords: Traffic Congestion; Temporal Model Matrix; Reachability Matrix; Interpretative Structural Model

基于解释结构模型的北京市快速路拥堵时空模型分析*

王卓, 毛鹤

北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044

摘要: 本文基于北京市快速路的实测交通流数据, 提出了北京市快速路的拥堵分级评价标准, 并根据交通流数据的时空特性建立了时空模型矩阵, 根据不同的拥堵等级阈值, 得到不同阈值下的拥堵时空模型矩阵, 计算出各自的可达矩阵。并采用解释结构模型法对可达矩阵进行划分, 得到不同阈值下的拥堵时空结构模型, 最后针对结构模型进行分析, 得出导致北京市快速路拥堵的直接原因和间接原因。本文研究能为道路拥堵分析和预防提供一条有效的途径, 为道路管理者提供一定的参考价值。

关键词: 交通拥堵; 时空模型矩阵; 可达矩阵; 解释结构模型

引言

交通拥堵是指某一时空由于交通需求和供给产生矛盾所引起的交通滞留现象, 主要是指道路交通设施所能提供的交通容量不能满足当前交通需求量而又得不到及时疏通的结果^[1]。无论是发达国家还是发展中国家的大城市都存在着不同程度的交通拥堵问题, 北京市作为一个国际化大都市, 道路交通拥堵已经极大地降低了城市的运转效率, 严重阻碍了社会和经济的发展, 影响了首都的整体形象, 因此交通拥堵成为迫切需要解决的问题。

本文通过分析交通流的时空分布特性, 研究基于解释结构模型的拥堵时空模型, 找出交通拥堵产生和发

*基金项目: 北京市科技支持项目“北京市区域交通状态和服务水平评价指标体系与评价方法研究”及“道路交通流仿真和预测预报系统”

展的内在时空规律，为缓解北京市交通拥堵问题提供一定的理论参考。

1 北京市快速路拥堵评价体系

交通拥堵评价是指通过定性或定量的评价指标对某区域内的交通拥堵状况进行评价，其主要作用是对比分析时空范围内的拥堵水平，从而确定拥堵治理政策和措施的可行性和有效性^[2]。

目前国内外一般采用城市主干道上机动车的平均车速来评价道路的拥堵程度。平均速度是一种直观的用来评价道路拥堵程度的量化指标，根据平均速度值的大小可以划分不同等级，不同等级的平均速度代表了不同的交通运行状态，通过对平均速度这一单因素的评价，从而可以判断道路的拥堵级别^[3]。本文结合北京市快速路实测交通流数据，同时参照道路通行能力手册 HCM2000 所建议的特大城市快速路运行状态划分标准，提出北京市快速路拥堵评价标准^[4]如下表 1 所示，其中较拥堵，拥堵和堵塞三种情况被称为拥堵情况。

表 1 北京市快速路拥堵评价标准

交通流运行状态分类	速度 (km/h)
畅通	>60
较畅通	40~60
较拥堵	30~40
拥堵	20~30
堵塞	<20

2 北京市快速路道路拥堵时空模型的建立

北京市道路交通拥堵分布态势具有典型性和代表性，交通拥堵问题在时空分布上也表现出了一些自身的特点。在时间上，北京市工作日中早高峰和晚高峰的拥堵现象十分典型，加上就业功能区的集中分布，导致拥堵情况更加严峻。通常情况下，晚高峰出现在 17 点 30 分至 19 点。在空间上，北京市拥堵空间分布规律性也比较强，城市路网运行状况正在形成“多中心+环线”的空间布局形式，主要表现在以多个经济发达区域为中心，以快速路环线承担主要交通量，主干路和支路辅助分流的空间道路网布局^[3]。

本文结合北京市 2009 年 4 月 21 日三环路交通流实测数据，根据北京市道路拥堵的时间和空间特点，建立道路拥堵时空模型矩阵如下：

$$\begin{bmatrix}
 & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 \\
 s_1 & v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} & v_{16} & v_{17} & v_{18} & v_{19} \\
 s_2 & v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} & v_{25} & v_{26} & v_{27} & v_{28} & v_{29} \\
 s_3 & v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} & v_{35} & v_{36} & v_{37} & v_{38} & v_{39} \\
 s_4 & v_{41} & v_{42} & v_{43} & v_{44} & v_{45} & v_{46} & v_{47} & v_{48} & v_{49} \\
 s_5 & v_{51} & v_{52} & v_{53} & v_{54} & v_{55} & v_{56} & v_{57} & v_{58} & v_{59} \\
 s_6 & v_{61} & v_{62} & v_{63} & v_{64} & v_{65} & v_{66} & v_{67} & v_{68} & v_{69} \\
 s_7 & v_{71} & v_{72} & v_{73} & v_{74} & v_{75} & v_{76} & v_{77} & v_{78} & v_{79} \\
 s_8 & v_{81} & v_{82} & v_{83} & v_{84} & v_{85} & v_{86} & v_{87} & v_{88} & v_{89} \\
 s_9 & v_{91} & v_{92} & v_{93} & v_{94} & v_{95} & v_{96} & v_{97} & v_{98} & v_{99}
 \end{bmatrix}$$

其中：t---时间，s---地点，v---车速。

根据三环路车速的部分实测数据，选取晚高峰时段，莲花桥至四通桥路段作为研究对象，建立一个时间、

地点、速度的时空模型矩阵如下：

	16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥	30.01	27.119	27.191	18.593	35.361	29.357	23.418	56.762	22.793
新兴桥 → 玉渊潭	11.821	10.41	44.567	9.199	7.446	7.588	25.975	23.738	43.349
玉渊潭 → 航天桥	24.966	19.919	44.562	26.533	21.818	20.743	30.623	19.486	31.229
航天桥 → 花园桥	68.719	64.539	78.615	55.298	59.524	39.92	47.925	40.281	63.465
花园桥 → 紫竹桥	35.028	43.418	23.029	33.072	50.095	21.519	20.752	17.803	35.765
紫竹桥 → 为公桥	27.484	22.448	23.566	25.239	32.315	14.719	16.494	14.24	23.084
为公桥 → 苏州桥	49.106	53.941	50.145	51.749	62.058	57.534	49.935	31.741	35.174
苏州桥 → 三义庙	59.906	63.678	64.636	55.677	68.841	61.993	58.994	28.1	54.263
三义庙 → 四通桥	69.15	73.523	70.007	39.489	15.892	16.066	20.41	66.637	68.379

根据前面提到的北京市道路拥堵评价划分标准，针对较拥堵，拥堵和堵塞三种情况，选取不同的阈值 $\lambda=20, 30, 40$ ，结合下式（1）得出不同 λ 水平下的道路拥堵时空模型矩阵如表 2, 3, 4 所示。

$$W_{ij}^a = \begin{cases} 1, W_{ij} \leq \lambda \\ 0, W_{ij} > \lambda \end{cases} \quad (1)$$

表 2 $\lambda=20$ 水平截矩阵

	16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥	0	0	0	1	0	0	0	0	0
新兴桥 → 玉渊潭	1	1	0	1	1	1	0	0	0
玉渊潭 → 航天桥	0	1	0	0	0	0	0	1	0
航天桥 → 花园桥	0	0	0	0	0	0	0	0	0
花园桥 → 紫竹桥	0	0	0	0	0	0	0	1	0
紫竹桥 → 为公桥	0	0	0	0	0	1	1	1	0
为公桥 → 苏州桥	0	0	0	0	0	0	0	0	0
苏州桥 → 三义庙	0	0	0	0	0	0	0	0	0
三义庙 → 四通桥	0	0	0	0	1	1	0	0	0

表 3 $\lambda=30$ 水平截矩阵

	16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥	0	1	1	1	0	1	1	0	1
新兴桥 → 玉渊潭	1	1	0	1	1	1	1	1	0
玉渊潭 → 航天桥	1	1	0	1	1	1	0	1	0
航天桥 → 花园桥	0	0	0	0	0	0	0	0	0
花园桥 → 紫竹桥	0	0	1	0	0	1	1	1	0
紫竹桥 → 为公桥	1	1	1	1	0	1	1	1	1
为公桥 → 苏州桥	0	0	0	0	0	0	0	0	0
苏州桥 → 三义庙	0	0	0	0	0	0	0	1	0
三义庙 → 四通桥	0	0	0	0	1	1	1	0	0

根据不同阈值的水平矩阵计算出各个可达矩阵，对 λ 水平截矩阵与单位矩阵 I 相加的结果进行自乘运算后，矩阵达到稳态，由此得到不同 λ 水平下的拥堵可达矩阵如表[5][6][7]。

表 4 $\lambda = 40$ 水平截矩阵

	16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥	1	1	1	1	1	1	1	0	1
新兴桥 → 玉渊潭	1	1	0	1	1	1	1	1	0
玉渊潭 → 航天桥	1	1	0	1	1	1	1	1	1
航天桥 → 花园桥	0	0	0	0	0	1	0	0	0
花园桥 → 紫竹桥	1	0	1	1	0	1	1	1	1
紫竹桥 → 为公桥	1	1	1	1	1	1	1	1	1
为公桥 → 苏州桥	0	0	0	0	0	0	0	1	1
苏州桥 → 三义庙	0	0	0	0	0	0	0	1	0
三义庙 → 四通桥	0	0	0	1	1	1	1	0	0

上述运算遵循布尔运算规则:

$$0+0=0;1+0=1;1+1=1;0\times 0=0;1\times 0=1;1\times 1=1$$

表 5 $\lambda = 20$ 可达矩阵($M^3=M^4$)

	16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥	1	0	0	1	0	0	0	0	0
新兴桥 → 玉渊潭	1	1	0	1	1	1	1	1	0
玉渊潭 → 航天桥	1	1	1	1	1	1	1	1	0
航天桥 → 花园桥	0	0	0	1	0	0	0	0	0
花园桥 → 紫竹桥	0	0	0	0	1	0	0	1	0
紫竹桥 → 为公桥	0	0	0	0	0	1	1	1	0
为公桥 → 苏州桥	0	0	0	0	0	0	1	0	0
苏州桥 → 三义庙	0	0	0	0	0	0	0	1	0
三义庙 → 四通桥	0	0	0	0	1	1	1	1	1

表 6 $\lambda = 30$ 可达矩阵($M^2=M^3$)

	16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥	1	1	1	1	1	1	1	1	1
新兴桥 → 玉渊潭	1	1	1	1	1	1	1	1	1
玉渊潭 → 航天桥	1	1	1	1	1	1	1	1	1
航天桥 → 花园桥	0	0	0	1	0	0	0	0	0
花园桥 → 紫竹桥	1	1	1	1	1	1	1	1	1
紫竹桥 → 为公桥	1	1	1	1	1	1	1	1	1
为公桥 → 苏州桥	0	0	0	0	0	0	1	0	0
苏州桥 → 三义庙	0	0	0	0	0	0	0	1	0
三义庙 → 四通桥	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3 基于解释结构模型的拥堵时空模型分析

解释结构模型 (ISM) 是美国 J. 华费尔特教授于 1973 年作为分析复杂的社会经济系统有关问题的一种方法而开发的, 是用于分析和揭示复杂关系结构的有效方法, 它可将系统中各要素之间的复杂、凌乱关系划

分成清晰的分层的结构形式^[5]。ISM 方法应用的基本步骤是选择构成系统的要素，建立邻接矩阵和可达矩阵，对可达矩阵进行划分后建立结构模型，根据结构模型建立解释结构模型^[6]。借鉴 ISM 方法对可达矩阵的划分过程，可以实现对具有不对称性的关联强度可达矩阵的划分。

表 7 $\lambda=40$ 可达矩阵($M^2=M^3$)

		16 : 30	16 : 50	17 : 10	17 : 30	17 : 50	18 : 10	18 : 30	18 : 50	19 : 10
莲花桥 → 新兴桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1
新兴桥 → 玉渊潭		1	1	1	1	1	1	1	1	1
玉渊潭 → 航天桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1
航天桥 → 花园桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1
花园桥 → 紫竹桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1
紫竹桥 → 为公桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1
为公桥 → 苏州桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1
苏州桥 → 三义庙		0	0	0	0	0	0	0	1	0
三义庙 → 四通桥		1	1	1	1	1	1	1	1	1

具有不对称性的关联强度可达矩阵可反映系统的总体结构，即不仅反映了系统中各要素之间的直接关系，而且，反映了系统中各要素之间的间接关系。可达矩阵划分的目的是可以更清晰的了解系统中各要素之间的层级关系，最顶层表示系统的最终目标，往下各层分别表示是上一层的原因。

可达集合 $R(S_i)$ ：可达矩阵中要素 S_i 对应的行中，包含有 1 的矩阵元素所对应的列要素的集合。代表要素 S_i 到达的要素。

先行集合 $Q(S_i)$ ：可达矩阵中要素 S_i 对应的列中，包含有 1 的矩阵元素所对应的行要素的集合。交集 $A = R(S_i) \cap Q(S_i)$ 。

对可达矩阵进行划分，首先把可达集合与先行集合及其交集列出。

表 8--12 为 $\lambda=20$ 的可达矩阵划分过程。

表 8 可达集合、先行集合及其交集

i	$R(S_i)$	$Q(S_i)$	$R(S_i) \cap Q(S_i)$
1	1,4	1,2,3	1
2	1,2,4,5,6,7,8	2,3	2
3	1,2,3,4,5,6,7,8	3	3
4	4	1,2,3,4	4
5	5,8	2,3,5,9	5
6	6,7,8	2,3,6,9	6
7	7	2,3,6,7	7
8	8	2,3,5,6,8,9	8
9	5,6,7,8,9	9	9

对可达矩阵进行划分，首先把可达集合与先行集合及其交集列出如表 8 所示。划分方法是根据

$R(S_i) \cap Q(S_i) = R(S_i)$ 条件来进行层级的抽取。表中 $i=4,7,8$ 符合条件，把表 8 中有关 4, 7, 8 要素都抽取掉得到表 9。

表 9 抽取 4,7,8 的结果

i	$R(S_i)$	$Q(S_i)$	$R(S_i) \cap Q(S_i)$
1	1,4	1,2,3	1
2	1,2,4,5,6	2,3	2
3	1,2,3,4,5,6	3	3
5	5	2,3,5,9	5
6	6	2,3,6,9	6
9	5,6,9	9	9

从表 9 中，发现此时满足 $R(S_i) \cap Q(S_i) = R(S_i)$ 条件的有 $i=5,6$ ，把表 9 中有关 5, 6 要素都抽取掉得到表 10。

表 10 抽取 5,6 的结果

i	$R(S_i)$	$Q(S_i)$	$R(S_i) \cap Q(S_i)$
1	1	1,2,3	1
2	1,2	2,3	2
3	1,2,3	3	3
9	9	9	9

从 10 表中，发现此时满足 $R(S_i) \cap Q(S_i) = R(S_i)$ 条件的有 $i=1,9$ ，把表 10 中有关 1,9 要素都抽取掉得到表 11。

表 11 抽取 1,9 的结果

i	$R(S_i)$	$Q(S_i)$	$R(S_i) \cap Q(S_i)$
2	2	2,3	2
3	2,3	3	3

从 11 表中，发现此时满足 $R(S_i) \cap Q(S_i) = R(S_i)$ 条件的有 $i=2$ ，把表 10 中有关 2 要素都取掉得到表 12。

表 12 抽取 2 的结果

i	$R(S_i)$	$Q(S_i)$	$R(S_i) \cap Q(S_i)$
3	3	3	3

根据上述抽取结果，得到 $\lambda = 20$ 拥堵时空结构模型如图 1 所示。同理得到 $\lambda = 30$ ， $\lambda = 40$ 拥堵时空模型如

图 2,3 所示。

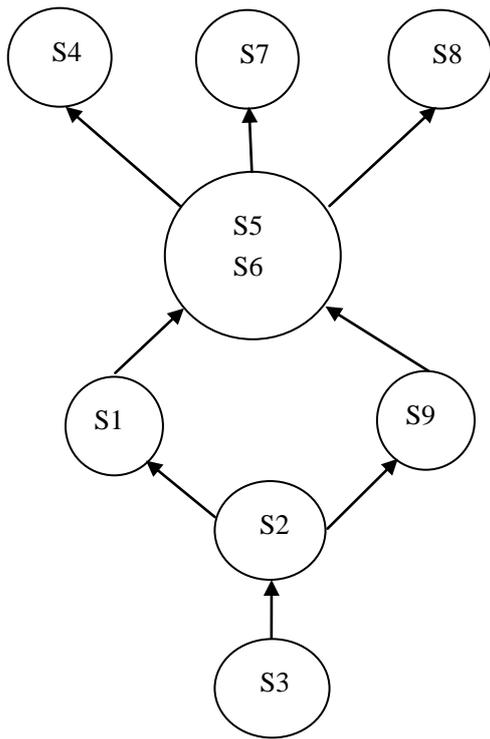


图 1 $\lambda = 20$ 的拥堵时空结构模型

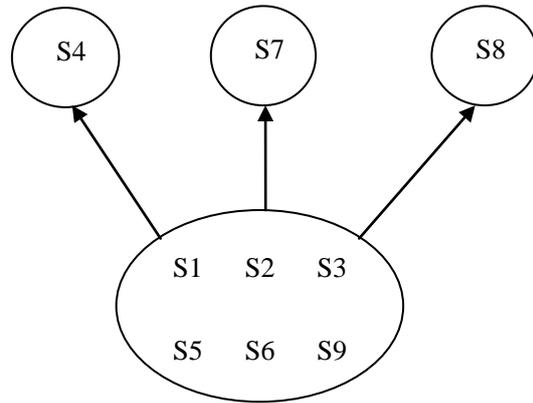


图 2 $\lambda = 30$ 的拥堵时空结构模型

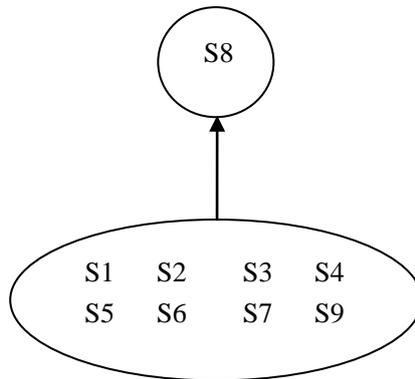


图 3 $\lambda = 40$ 的拥堵时空结构模型

4 结构模型分析

(1) $\lambda = 20$ 的拥堵时空结构模型分析（堵塞情况）

当 $\lambda = 20$ 即当道路发生堵塞时，时间和空间影响因素可体现为五个层次，其中：

第 5 层的时间：17: 30; 18: 30; 18: 50，地点：航天桥---花园桥；为公桥---苏州桥；苏州桥---三义庙，是道路发生堵塞的最直接，最表层的原因。

第 4 层的时间：17: 50; 18: 10，地点：花园桥---紫竹桥；紫竹桥---为公桥，时间和地点对第五层有直接影响，是道路堵塞的浅层原因。

第 3 层的时间：16: 30; 19: 10，地点：莲花桥---新兴桥；三义庙---四通桥，是中层影响因素，也是最关键因素之一，它起着承上启下的作用，直接影响第四层的时间和地点因素，并通过第四层的因素对第五层的堵塞时间和地点产生影响。

第 2, 1 层的时间：16: 50，地点：新兴桥---玉渊潭；时间：17: 10，地点：玉渊潭---航天桥，是道路

堵塞的最深层次因素，它通过不同渠道对其他因素产生直接或间接的影响。

(2) $\lambda=30$ 的拥堵时空结构模型分析（拥堵情况）

当 $\lambda=30$ 即当道路发生拥堵时，时间和空间影响因素可体现为两个层次，其中：

第 2 层的时间：17: 30; 18: 30; 18: 50，地点：航天桥---花园桥；为公桥---苏州桥；苏州桥---三义庙，是道路发生堵塞的最直接，最表层的原因。

第 1 层的时间：17: 50; 18: 10; 16: 30; 19: 10; 16: 50; 17: 10，地点：花园桥---紫竹桥；紫竹桥---为公桥；莲花桥---新兴桥；三义庙---四通桥；新兴桥---玉渊潭；玉渊潭---航天桥，是道路堵塞的最深层次因素。

(3) $\lambda=40$ 的拥堵时空结构模型分析（较拥堵情况）

当 $\lambda=40$ 即当道路发生较拥堵情况时，时间和空间影响因素可体现为两个层次，其中：第 2 层的时间：17: 30，地点：航天桥---花园桥，是道路发生堵塞的最直接，最表层的原因。

第 1 层的时间：17: 50; 18: 10; 16: 30; 19: 10; 16: 50; 17: 10; 18: 30; 18: 50，地点：花园桥---紫竹桥；紫竹桥---为公桥；莲花桥---新兴桥；三义庙---四通桥；新兴桥---玉渊潭；玉渊潭---航天桥；为公桥---苏州桥；苏州桥---三义庙，是道路堵塞的最深层次因素。

(4) 随着 λ 值的增加，结构模型的层数减少，造成拥堵的深层次的因素（即拥堵的时间和地点）也越来越多，这说明在拥堵和较拥堵的情况下，各路段和各时间对于造成拥堵的影响是差不多的，而当堵塞的情况下，结构模型的层数增加，造成拥堵的深层次因素也是唯一的，这说明在堵塞条件下，某一路段和某一时间对于造成拥堵的影响是十分显著的，如要减轻拥堵，就要针对这一地点和时间提出具体的改进措施，从而缓解整个三环路拥堵的状况。

5 结论

(1) 导致道路拥堵发生的原因是多种多样的，道路拥堵时空模型的建立仅考虑的是时间-空间和速度（也可以是流量和占有率等交通流数据）三个方面，而探究拥堵发生的真正原因时要从多个方面考虑，尤其要从管理的角度去消除拥堵的发生。

(2) 采用解释结构模型法分析道路拥堵的原因，通过结构模型可以直观的判断出导致道路拥堵的最深层次时间和地点，可以为交通管理者提供参考。

(3) 时空模型的建立主要依赖于交通流数据，但交通流数据的采样间隔选取，以及传感器测量误差的存在，使得模型的建立存在一定的误差，这在一定程度上影响结构模型法的有效应用。

REFERENCES

- [1] 陆化普. 解析城市交通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [2] 曹晓飞. 城市道路交通拥堵评价方法及其应用[M]. 北京: 北京交通大学硕士学位论文, 2008
- [3] 迟骋. 北京市路段交通拥堵评价体系研究[M]. 北京: 北京交通大学硕士学位论文, 2007.
- [4] 陈艳艳, 刘小明, 梁颖. 可靠度在交通系统规划与管理中的应用[M]. 人民交通出版社, 北京. 2005
- [5] 夏绍玮, 杨家本, 杨振斌. 系统工程概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995 年 1 月第 1 版
- [6] 谭跃进, 陈英武, 易进先. 系统工程原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999 年 11 月第 1 版

【作者简介】

¹王卓 (1975-), 女, 吉林长春人, 北京交通大学交通运输学院副教授, 博士后, 主要研究方向为道路交通安全, 铁路智能系统。Email: wangzhuo@jtys.bjtu.edu.cn

²毛鹤 (1989-), 女, 甘肃定西人, 北京交通大学交通运输学院在读硕士研究生, 主要研究方向为道路交通安全, 铁路智能系统。Email: 12121004@bjtu.edu.cn