

# 考虑路边停车带影响的非机动车压缩交通波模型

陈峻<sup>1</sup>, 王紫<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 210096 南京; 2. 徐州市交通规划设计研究院, 221006 江苏 徐州)

**摘要:**为了解析设置于物理分隔非机动车道的路内停车带对于非机动车交通运行的影响,以非机动车集群通行和压缩特性为基础,基于流体力学中的气流分析理论,分别提出了描述机动车辆停放过程影响条件下的非机动车流减速-跟驰和停车的压缩系数计算方法,进而建立了非机动车压缩交通波模型.应用该模型,提出了非机动车流由于路内停车带设置引起的最不利时刻的排队长度计算方法,并以此为依据,建立了路内停车泊位与上游交叉口最短距离设置方法.以苏州市东中市路实测交通数据为基础,将压缩交通波模型与实际停车波速进行对比,发现相对误差的平均值为8.57%,而合理控制非机动车停车干扰的时间及非机动车流密度两个参数,可以有效降低排队自行车流延伸至上游交叉口,从而缓解交通拥堵和降低交通安全隐患.

**关键词:**非机动车道;路内停车;非机动车交通流;压缩交通波

**中图分类号:** U491.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)06-0114-05

## Model of bicycle compression wave based on the effect caused by curb parking on bicycle lane

CHEN Jun<sup>1</sup>, WANG Zi<sup>2</sup>

(1. Transportation College, Southeast University, 210096 Nanjing, China;

2. Xuzhou Communication Planning and Design Institute, 221006 Xuzhou, Jiangsu, China)

**Abstract:** To analyze the effect of bicycle flow caused by curb parking on segregated bicycle lane, this paper analyzed the group and compression characteristic of bicycle flow. Then based on airflow analysis method, we put forward the model of bicycle compression wave to describe the state of cycle deceleration-following and stop under the influence of parking process of vehicles. By means of the model, the maxim queuing position is calculated when the situation caused by curb parking is the worst. Furthermore, the shortest distance between curb-parking space and upper intersection is calculated. Based on the field data measured at Dongzhongshi Road in Suzhou city, comparing the calculated results with the real stop wave rate, the average value of relative error is less than 8.57%. By controlling the interference time of bicycle and density of bicycle flow, the phenomenon that queuing bicycles extend to upper intersection can be reduced effectively, so that the traffic congestion can be relieved and the traffic hidden danger can be reduced.

**Key words:** bicycle lane; curb parking; bicycle flow; compression traffic wave

随着我国城市机动化水平快速增长,城市居民的出行方式结构呈现出快速的变化,并突出表现为机动车出行和停放需求的增长与非机动车出行总量的减少.为了适应这一趋势,很多城市对既有的三、四幅道路功能进行重新配置,利用原物理

隔离的非机动车专用道设置路内停车带,这种新的方法在一定程度增加了停车供给资源,但是另一方面,非机动车道的缩窄以及机动车停放过程也会影响非机动车的有序通行,并增加安全隐患,因此,如何解析两种车辆的相互作用,进而寻求合理的停车带设置方法,具有重要的意义.

既有文献关于路内停车设置对动态交通的影响研究成果丰富,涉及道路宽度缩窄条件下机动车通行能力及服务水平变化<sup>[1-4]</sup>,以及停车带

收稿日期: 2012-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078084, 51238008).

作者简介: 陈峻(1972—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 陈峻, chenjun@seu.edu.cn.

设置对于机动车交通运行的影响<sup>[5-6]</sup>,面向机动、非机动车辆之间的相互干扰的量化表达<sup>[7]</sup>以及一幅道路条件下停车带设置对于机非混合交通流的影响<sup>[8]</sup>,从多种角度解析了停与行的动态作用关系.然而,在路内停车带设置于非机动车道对于纯自行车交通流运行状态的影响以及设置条件的量化研究基本处于空白,是本文研究的重点.

## 1 基于压缩模型的非机动车交通波模型的建立

利用非机动车道设置路内停车带及机动车停放和驶离通道的方式主要有两种形式,一是利用路段机、非分隔带进出和停放,二是利用非机动车交叉口出口道驶入和停放,如图1所示.

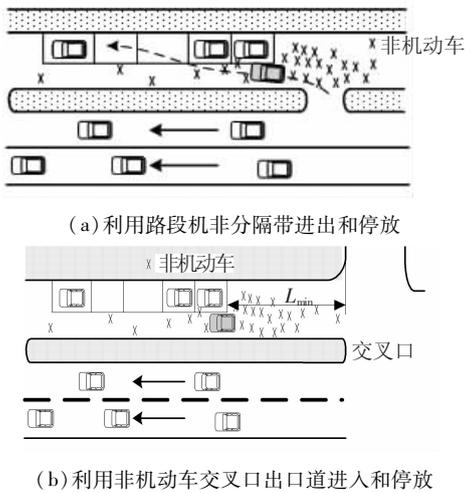


图1 非机动车道设置路内停车带及车辆停放过程示意图

由图1可知,非机动车道设置路内停车对于非机动车交通流的影响主要表现在:1)由于停车位设置对道路面积的占用,使得非机动车总体通行能力降低;2)停靠车辆在进出停车位过程中,对于非机动车交通流运行状态的影响.上述影响将阻碍后续非机动车流的行进,从而产生减速-跟驰-排队状态,甚至延伸至上游交叉口,产生交通拥堵和安全隐患,即排队车辆长度超过 $L_{min}$ 值,图1(b)所示.

路内停车带的设置及车辆停放、驶离过程将迫使非机动车流产生一个与运行方向相反的交通波,可以通过交通波模型描述相关状态.然而,传统的交通波模型<sup>[9-10]</sup>以格林希尔治模型为基本形式,主要适用于机动车交通流运行状态的表达.由于非机动车没有固定的行车道和运行轨迹,具有明显的集群压缩特性,因此,本文将受到路内停车带设置影响的自行车交通流压缩特性类比为空气流体,进行模型的研究与建立.

### 1.1 非机动车交通流减速和停驶压缩特性

在流体力学中,气流的压缩性与两个因素有关,一是气流的速度,二是由于某种原因使得气流参数发生变化所产生的扰动波在介质中的传播速度.扰动波的传播速度的大小与介质的可压缩性密切相关,因而它是介质的重要属性之一.在流体力学中,气流马赫数(Mach number)综合这两个因素,表示流动气体的压缩性<sup>[11]</sup>.马赫数表示流体质点的运动速度与该介质中的扰动波的传播速度之比,该数值越大,介质的压缩性的影响越明显,即

$$Ma = v/c. \quad (1)$$

式中: $Ma$ 为马赫数; $v$ 为流体自身的速度,m/s; $c$ 为微扰动在流体中的传播速度,m/s.

气流的可压缩性与马赫数的关系可以由欧拉运动微分方程表示<sup>[12]</sup>为

$$-Ma^2 \frac{dv}{v} = \frac{d\rho}{\rho}. \quad (2)$$

式中: $dv/v$ 为气流速度的相对变化量; $d\rho/\rho$ 为气流密度的相对变化量.

此微分方程揭示了气体速度变化引起的密度变化与气体压缩性的关系,用马赫数表示气体的压缩性.为了定量描述非机动车流的可压缩性,本文根据式(2),建立压缩系数与非机动车交通流自身速度与密度相对变化量的关系,其微分方程表示为

$$-a^2 \frac{du}{u} = \frac{dk}{k}. \quad (3)$$

式中: $a$ 为非机动车流压缩系数; $du/u$ 和 $dk/k$ 分别为非机动车流的速度和密度的相对变化量.

式(3)的差分形式为

$$-a^2 \frac{u_2 - u_1}{u_1} = \frac{k_2 - k_1}{k_1}. \quad (4)$$

式中: $u_1$ 为压缩前非机动车流的速度,km/h或m/s; $u_2$ 为压缩后非机动车流的速度,km/h或m/s; $k_1$ 为压缩前非机动车流的密度,辆/m<sup>2</sup>; $k_2$ 为压缩后非机动车流的密度,辆/m<sup>2</sup>.

式(4)表明,非机动车压缩系数与速度的相对变化量和速度变化引起的密度相对变化量有关,由速度和密度的关系式,便可以将上式中的速度用密度替代,这样压缩系数的大小就可以只用非机动车流的密度参数来表示,从而建立压缩系数与密度的直接关系.如果非机动车交通流运行过程中受到机动车停车扰动,将会产生减速跟驰行驶或停车等待现象,由此造成的密度变化有可能导致后续交通流被压缩.本文将非机动车减速跟驰行驶定义为一般情况,将非机动车停车定义

为特殊情况,分别进行公式表达.当非机动车处于减速跟驰行驶状态时,将非机动车交通流速度与密度的关系式代入式(3)中,得到压缩系数与密度的关系式.假设非机动车流速度与密度的关系通式为

$$u = f(k). \tag{5}$$

则

$$\frac{du}{dk} = f'(k). \tag{6}$$

由于速度的变化和密度的变化不是同方向的,式(6)中  $f'(k) < 0$ . 将式(6)代入式(3)得

$$-a^2 = \frac{f(k)}{f'(k) \times k}. \tag{7}$$

因此有

$$a = \sqrt{-\frac{f(k)}{f'(k) \times k}}. \tag{8}$$

由上述分析可以知道,只要交通流的密度发生变化,就可能会产生压缩,也就会存在一个压缩系数,这种情况下的压缩系数是密度变化程度的一个表征.当路内停车造成的影响较为严重,以致非机动车流需要停止排队时,非机动车流的压缩现象较一般情况更为明显.这种特殊情况下,由于路内停车造成非机动车流中断,压缩后非机动车流的密度逐渐变大,最终变为阻塞密度,末速度变为零.因此在上式中,末密度  $k_2 = k_j$ ,末速度  $u_0 = 0$ ,则式(4)变为

$$a^2 = \frac{k_j - k_1}{k_1}. \tag{9}$$

式中:  $k_j$  为非机动车流阻塞密度,辆/m<sup>2</sup>;

由于  $a$  表示非机动车流的压缩程度,所以取正值,即

$$a = \sqrt{\frac{k_j - k_1}{k_1}}. \tag{10}$$

### 1.2 基于压缩特性的非机动车交通波模型建立

在式(1)中,  $c$  为扰动在流体中的传播速度,在交通流中,这一物理量相当于交通波波速.交通波就是由于交通流中的扰动,使得密度变化段在交通流中的移动的现象.因此本文根据流体力学中马赫数的定义,建立交通压缩系数与交通波波速的关系式为

$$a = \frac{u}{u_w}. \tag{11}$$

式中:  $u_w$  为交通波波速,km/h 或 m/s.

因此,非机动车交通波波速可表达为

$$u_w = \frac{u}{a}. \tag{12}$$

对一般情况和特殊情况下的交通波模型进行

求解,一般情况下,计算交通波波速是将式(8)代入式(12),可得

$$|u_w| = \left| \frac{u}{a} \right| = \left| f(k) \sqrt{-\frac{f'(k) \times k}{f(k)}} \right|. \tag{13}$$

式中:  $|u_w|$  为交通波波速大小,km/h 或 m/s,交通波的方向根据实际情况而定.

文献[12]表明,非机动车流速度和密度之间存在着一定的关系.在拥挤状态下,非机动车速度-密度线性模型为

$$u = A + Bk, \quad k \geq k_0. \tag{14}$$

式中:  $A, B$  均为待定系数;  $k_0$  为临界密度.

根据模型可以导出

$$f'(k) = B. \tag{15}$$

将式(14)、(15)代入式(8),整理得

$$a = \sqrt{\frac{A + Bk}{-Bk}}. \tag{16}$$

再代入式(12),得出波速

$$|u_w| = \left| \sqrt{-Bk(A + Bk)} \right|. \tag{17}$$

在非机动车队遇路内停车而造成非机动车停车等待的情况下,将式(10)代入式(12),可以得到特殊情况下交通波波速(即停车波波速)为

$$u_w = -\frac{u}{\sqrt{\frac{k_j - k_1}{k_1}}} = -u \sqrt{\frac{k_1}{k_j - k_1}}. \tag{18}$$

因此,当获取非机动车流遇到路内停放车辆时的速度和密度数据,可以通过式(17)、(18),分别计算出相应的减速和停车波速.

## 2 基于停车波模型的路内停车泊位与上游交叉口最短距离计算方法

图1表明,路内停车造成的最不利情况是拟停放机动车辆在路内停车带位置长时间的占用非机动车道,导致剩余的道路宽度不允许非机动车穿越,从而产生停车排队等待.这种排队如果延伸至上游交叉口,将会阻碍交叉口其他转向车流的运行,导致交通拥堵和安全问题.因此,本文将路内停车带与上游交叉口应保持的最短距离定义为  $L_{min}$ ,应用已经建立的压缩停车波模型,提出  $L_{min}$  的计算方法,为合理设置路内停车泊位的位置提供依据.

### 2.1 排队非机动车的阻塞时长

当拟停放机动车辆干扰结束后,即非机动车道宽度恢复到可供非机动车流通过时,排队的非机动车辆开始消散,并形成一起动波.但是在消散初期,后续到达的非机动车仍然需要排队,因此阻塞仍要持续一段时间,由此产生的总阻塞时长

$t_B$  可表达为排队形成时间(即拟停放机动车的持续干扰时长  $r$ ) 与排队消散时间  $t_b$  之和。

假设非机动车排队完全消散的时间为  $t_b$ , 消散时以饱和流率释放, 则

$$q_b(r + t_b) = S_b t_b. \quad (19)$$

式中:  $q_b$  为非机动车的到达率, 辆/( $m \cdot s$ );  $r$  为非机动车受拟停放机动车辆持续干扰时长,  $s$ ;  $S_b$  为非机动车交通流的饱和流率, 辆/( $m \cdot s$ ).

由上式可计算得出排队消散的时间为

$$t_b = \frac{q_b r}{S_b - q_b}. \quad (20)$$

因此, 阻塞时间  $t_B$  为

$$t_B = r + t_b = r + \frac{q_b r}{S_b - q_b}. \quad (21)$$

## 2.2 路内停车泊位与上游交叉口最短距离计算模型

当非机动车流起动车波赶上停车波时, 车队的排队长度达到最大, 即排队延伸至停车波或起动车波传播的最远位置, 可表达为

$$L_{\min} = u_w \times t_B = u_w(r + t_b). \quad (22)$$

式中:  $L_{\min}$  为非机动车排队最远位置距离非机动车开始停车点的距离,  $m$ .

将式(20)代入式(22), 整理得

$$L_{\min} = u_w \cdot \frac{S_b \cdot r}{S_b - q_b} = u_1 \cdot \sqrt{\frac{k_1}{k_j - k_1}} \cdot \frac{S_b \cdot r}{S_b - q_b}. \quad (23)$$

路内停车泊位距离上游交叉口的最近的距离应小于  $L_{\min}$ , 这样才能保证非机动车排队不影响上游交叉口的正常运行。

## 3 模型验证

### 3.1 非机动车压缩交通波模型的验证

为了验证方便, 本文以特殊情况下产生的实测非机动车停车波为例进行模型验证. 由于路内停车影响下实际停车波所需数据不易获取, 本文以非机动车在交叉口遇红灯时的运行状态验证停车波模型. 实测数据以苏州市东中市路非机动车进口道为研究对象, 该交叉口的道路状况以及调查方案如图2所示, 非机动车道宽度为1 m, 理论上非机动车无法并行, 方便交通波模型的验证。

非机动车交通流参数的观测采用摄像法. 观测站(即摄像机所在位置)距离停车线大于70 m, 作为观测区域, 同时以观测站为中心画出距离为2 m的小距离路段(分别记为标线A和标线B), 用于记录非机动车交通量和行程车速. 为了观测非机动车交通流实际停车波波速, 在观测区域内从停车线开始沿车道向后放置刻度标记, 红灯启

亮后开始记录非机动车停止时距离停车线的距离和该车的停车时刻, 就可以计算出实际停车波的大小。

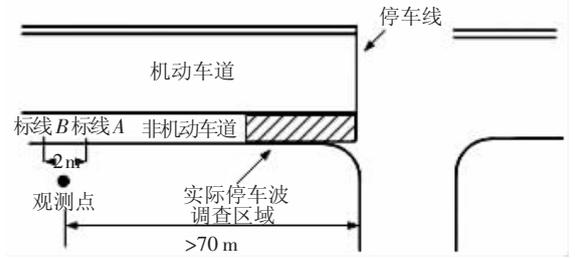


图2 停车波调查示意图

通过交通调查实测的相关数据以交叉口信号周期为统计单元, 经过高峰和平峰车流观测, 得到每个周期非机动车停车位置和停车时刻, 进而计算得到基于实际观测数据的停车波波速  $u_{wr} = \frac{s_m - s_n}{t_m - t_n}$ , 相关信息如表1所示, 表中  $t_m$  和  $t_n$  分别为停车波观测区域内第  $m$  辆和第  $n$  辆非机动车停车时刻,  $s$ ;  $s_m$  和  $s_n$  分别为观测区域第  $m$  辆和第  $n$  辆非机动车停车位置,  $m$ . 受篇幅限制, 本文仅列出前3个周期的调查和计算结果。

表1 非机动车停车波实际波速相关信息表

周期序号	$t_n/s$	$s_n/m$	$t_m/s$	$s_m/m$	$u_{wr}/(m \cdot s^{-1})$
1	1.62	0.2	4.2	4.5	1.69
2	5.03	1.8	8.2	6.0	1.31
3	3.95	0.1	10.6	7.5	1.11

根据每个周期统计数据进一步得到的非机动车密度和速度, 将其代入式(18), 可得到基于压缩停车波模型的波速  $u_{wc}$  值, 相关信息如表2所示. 表中  $Q$  为非机动车交通量, 辆/( $m \cdot s$ );  $u_l$  为路段时间平均速度,  $m/s$ ;  $u_s$  为路段区间平均速度,  $m/s$ ;  $\sigma_l^2$  为路段时间平均速度观测值方差;  $t_A$  为非机动车到达观测点A标记的时刻,  $s$ ;  $t_B$  为非机动车到达观测点B标记的时刻,  $s$ ;  $k$  为路段上车流密度, 辆/ $m^2$ ;  $k_j$  为阻塞密度, 辆/ $m^2$ .

为了将本文提出的压缩停车波模型波速的计算值与观测值进行比较, 引入相对误差  $e$ , 计算公式为

$$e = \frac{|u_{wc} - u_{wr}|}{u_{wr}} \times 100\%. \quad (24)$$

根据式(24), 得到停车波波速实际值与计算值之间的对比关系见图3. 计算结果表明, 本文建立的压缩交通波模型计算结果与实测停车波数据误差均在18%以下, 平均误差为8.57%, 误差较小, 在可以接受的范围内, 证明了非机动车停车波模型的可行性。

表 2 非机动车停车波计算波速相关信息表

周期序号	$Q/( \text{辆} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} )$	$u_t/( \text{m} \cdot \text{s}^{-1} )$	$\sigma_t^2$	$u_s/( \text{m} \cdot \text{s}^{-1} )$	$k/( \text{辆} \cdot \text{m}^{-2} )$	$k/( \text{辆} \cdot \text{m}^{-2} )$	$u_{wc}/( \text{m} \cdot \text{s}^{-1} )$
1	0.18	7.38	0.30	7.42	0.02	0.69	1.40
2	0.14	6.38	1.08	6.54	0.02	0.72	1.11
3	0.14	7.00	0.65	7.09	0.02	0.68	1.23

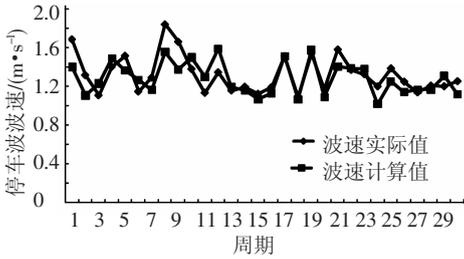


图 3 停车波波速实际值与计算值对比图

3.2 路内停车泊位与上游交叉口最短距离计算验证

基于本文 3.1 节的实测数据统计结果,取自行车饱和流率值  $S_b$  为  $1.0 \text{ 辆}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ,阻塞密度值  $k_j$  为  $0.67 \text{ 辆}/\text{m}^2$ [13]. 则决定  $L_{\min}$  大小的关键参数为  $u_1, k_1, q_b$  和  $r$ . 文献[14]提出了  $u_1, k_1, q_b$  三者关系模型:  $q_b = u_1 k_1, u_1 = 7.036 - 10.82 k_1$ , 将以上模型代入式(23),可得

$$L_{\min} = (7.036 - 10.82 k_1) \cdot \sqrt{\frac{k_1}{0.67 - k_1}} \cdot \frac{r}{1 - (7.036 - 10.82 k_1) \cdot k_1} \quad (25)$$

从式(25)可以看出: 1)  $L_{\min}$  的取值与拟停放机动车持续干扰时长  $r$  呈线性递增的关系, 干扰持续时间越长, 则自行车流可能的排队长度也越大. 2) 固定持续干扰时长  $r = 10 \text{ s}$ , 分别选取不同的压缩前非机动车流的密度  $k_1$ , 代入式(25) 计算  $L_{\min}$ , 结果如图 4 所示. 可以看出, 随着路段非机动车流密度的增加,  $L_{\min}$  也呈曲线上升趋势, 当密度大于  $0.12 \text{ 辆}/\text{m}^2$  时(对应  $L_{\min} = 86 \text{ m}$ ),  $L_{\min}$  值由近似线性增加转变为指数增长趋势. 因此, 建议对应自行车流量较大的路段, 路内停车泊位与上游交叉口最短距离取值应大于  $86 \text{ m}$ . 同时, 在计算具体路段的  $L_{\min}$  时, 使用高峰时段非机动车流的最大密度. 这样才能保证路内停车造成非机动车排队等待时, 非机动车的最远排队位置不至进入上游交叉口, 影响上游交叉口的有序运行.

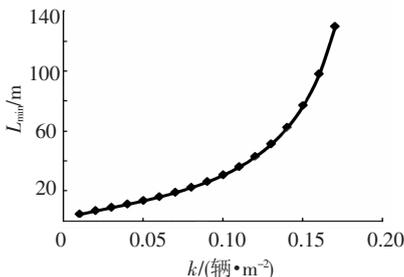


图 4  $L_{\min}$  与非机动车流密度关系图

4 结 论

1) 停车带的设置及机动车辆停放过程将影响非机动车流的运行状态.

2) 结合非机动车集群通行和压缩特性, 运用流体力学理论建立的压缩交通波模型, 可以更好地描述非机动车车减速跟驰和停车运行状态.

3) 非机动车交通流在路内停车造成的最不利情况下的最大排队长度, 主要受到持续干扰的时长以及非机动车流密度两个参数的影响, 对其进行控制和交通组织可以有效缓解交通拥堵和降低交通安全隐患.

参考文献

[1] Transportation Research Board. Parking management and supply [R]. Washington DC: [s. n.], 2003.

[2] FABIEN P. Curb parking: theory and model [M]. Berkeley: Institute of Transportation Studies University of California, 1978.

[3] RAWAL S, RODGERS G J. Modeling the gap size distribution of parked cars[J]. Physica A, 2005, 346 (3/4): 621 - 630.

[4] 裴玉龙, 杨中良. 基于广义费用最小的城市路边停车规划模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 879 - 882.

[5] SHOUP D C. Cruising for parking [J]. Transport Policy, 2006, 13(6): 479 - 486.

[6] 梁军, 李旭宏, 于洪君, 等. 路边停车对路段交通流的影响研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(2): 87 - 95.

[7] 龙小强, 晏启鹏. 非机动车道对机动车道干扰的流体内摩擦模型[J]. 中国公路学报, 2002(1): 100 - 102.

[8] 陈峻, 梅振宇, 王伟. 混合交通流条件下基于路内停车设置的路段车速阻滞模型[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 95 - 100.

[9] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

[10] 丹尼尔 L 洛格夫, 马休 J 休伯. 交通流理论[M]. 蒋璜, 任福田, 译. 北京: 人民交通出版社, 1983.

[11] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[12] 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

[13] 中国公路学会. 交通工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

[14] 王紫. 非机动车道上的机动车辆停放对动态交通影响分析[D]. 南京: 东南大学, 2012.

(编辑 魏希柱)