

# 考虑实施过程的车辆换道模型及其应用\*

杨小宝†

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)  
(2008 年 5 月 22 日收到, 2008 年 7 月 17 日收到修改稿)

通过对现有换道模型进行改进, 提出了一种考虑换道实施过程的模型, 并对模型中的关键参数进行了标定. 由于该模型考虑了换道实施过程中车辆换道对交通流的影响, 新模型的模拟结果与实测值更为符合. 运用新模型对不同车道数的道路交通流进行模拟, 发现不同车道数的平均每车道通行能力及其交通流特性存在显著差异.

关键词: 换道模型, 换道时间, 车道数, 道路通行能力

PACC: 0550, 0520

## 1. 引言

交通运输是国民经济的基础产业, 是社会经济发展快速、持续发展的重要生命线之一. 然而, 随着经济水平的提高, 原是方便人们的交通工具, 现在却成为了社会的公害——“交通公害”, 国内外许多大中城市里交通阻塞, 事故丛生, “城市交通病”已成为现代城市最棘手的痼疾之一<sup>[1]</sup>. 解决城市交通问题需要系统深入地研究城市交通拥堵的形成机理及其演化规律, 从微观层面上, 则要研究司机的驾驶行为, 揭示各种情况下交通流的演化规律.

车辆跟驰行为和换道行为是两个最基本的司机驾驶行为. 与跟驰行为相比, 换道行为需要考虑的车辆更多, 司机的决策过程更加复杂, 也更难于描述. 现有文献关于车辆换道行为的理论研究大致可分为三类: 微观仿真中的换道模型、元胞自动机模型中的换道规则和连续介质交通流模型中的换道分析. 微观仿真中的换道模型主要有 Gipps 模型<sup>[2]</sup>, MITSIM 模型<sup>[3]</sup>, SITRAS 模型<sup>[4]</sup>, Nagatani 模型<sup>[5-7]</sup>等; 元胞自动机模型最初由 Wolfram 提出, Nagel 和 Schreckenberg<sup>[8]</sup>将其改进首先运用到单车道道路交通研究中, 近年来, 通过引入换道规则, 已扩展到多车道交通流的研究中, 并取得了许多重要成果<sup>[9-12]</sup>. 连续介质交通流模型由 Lighthill, Whitham 以及 Richards 于 20 世纪 50 年代提出, 被称为 LWR 理论

或 KW(kinematic wave)理论, Daganzo, Laval 等<sup>[13-15]</sup>对这一研究进行了扩展, 运用流体力学方法深入分析了车辆换道对道路交通流的影响.

车辆换道过程可分解为需求、可行性检测和执行三个步骤. 目前的多数换道模型重点研究换道的需求和可行性检测, 很少关注换道的具体执行过程. 然而, 实际换道过程中车辆间相互的跟驰关系会发生变化, 没有考虑换道实施过程的模型不能很好地反映出换道过程中车辆间的相互干扰及其对整个交通流的影响. 本文在 Nagatani 模型的基础上, 提出了一种考虑实施过程的换道模型, 并运用新模型对不同车道数的道路交通流进行模拟, 分析了不同车道数的道路交通流特性的差异及其原因.

## 2. 考虑实施过程的车辆换道模型

### 2.1. Nagatani 换道模型及其评述

如图 1 所示, 车辆  $i$  为有换道意图的车辆, 本文称之为主车, 车辆  $i-1$  为主车在当前车道上的前车, 车辆  $i+1$  为主车在当前车道上的后车, 车辆  $j-1$  和  $j$  分别为主车的目标车道上的前车和后车. 并假定  $x_i$  和  $x_{i1}$  分别为主车和当前车道前车的位置;  $x_{j1}$  和  $x_j$  分别为目标车道前车和目标车道后车的位置;  $v_i$  和  $v_{i-exp}$  分别是主车的当前车速和理想期望速度;  $v_{j1}$  和  $v_j$  分别为目标车道前车和目标车道后车的

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB705503)和国家自然科学基金(批准号: 70521001)资助的课题.

† E-mail: yangxiaobao@jtys.bjtu.edu.cn

速度.

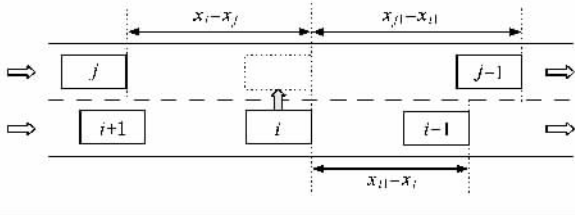


图 1 车辆之间的相互位置关系

Nagatani 等为了研究有一辆事故车时两车道道路交通流的变化特征,引入了一种新的换道模型<sup>[5]</sup>,本文称之为 Nagatani 模型.后来,他们又运用这一模型分析存在障碍物和公交车时两车道道路交通流的演化规律<sup>[6,7]</sup>均取得了良好的模拟效果.Nagatani 换道模型由三条规则组成,每条又包括换道动机和安全检测两部分,该模型采用间距检测,令临界安全间距为  $x_c$ ,它的换道规则可表述如下:

$$\begin{cases} v_i > v_{i1}, & (x_{i1} - x_i) < 4x_c \quad (\text{换道动机}), \\ (x_{j1} - x_i) > 2x_c, & (x_i - x_j) > x_c \quad (\text{安全因素}). \end{cases} \quad (1a)$$

$$\begin{cases} v_i > v_{i1}, & (x_{i1} - x_i) < 4x_c \quad (\text{换道动机}), \\ (x_{j1} > v_i, & (x_{j1} - x_i) > x_c \quad (x_i - x_j) > x_c \quad (\text{安全因素}). \end{cases} \quad (1b)$$

$$\begin{cases} (v_{i1} - x_i) < 2x_c & (\text{换道动机}), \\ (x_{j1} - x_i) > (x_{i1} - x_i), & (x_i - x_j) > x_c \quad (\text{安全因素}). \end{cases} \quad (1c)$$

车辆行驶时只要满足上述三条中的任一规则,车辆就会发生换道行为,虽然这一模型把换道检测细分为三条规则,综合考虑了基于速度优势和空间优势的换道行为,但仍存在一些缺陷:①它采用间距检测,没有考虑车辆的速度对最小间距的影响,实际运行中车速不同时可接受的最小间距值应是不同的,高速流时,可接受的最小间距明显大于低速流时的间距值;②当  $v_i > v_{i1}, v_{j1} \leq v_{i1} < v_i, (x_{i1} - x_i) = (x_{j1} - x_i) \in (2x_c, 4x_c), (x_i - x_j) > x_c$  同时满足时,符合规则一的条件,但此时主车不存在速度优势或空间优势,实际交通中应该不会实施换道;③它没有详细考虑换道实施过程中换道对周边车辆的影响.

### 2.2. 换道模型的改进

为了克服上述缺陷,本文对 Nagatani 模型进行了改进.新模型采用时距检测,具体的换道规则总结

在表 1 中,表 1 中  $\theta, \tau, \lambda$  是待定参数,  $f$  为换道可行性检测中最小安全间隙值,  $f$  是一个服从正态分布的随机变量,下一节将对其进行标定.规则一和规则二是基于速度优势的换道,而规则三是基于空间优势的换道.规则一表示如果主车的速度小于它的期望速度的一定比例,将会产生换道需求,若检测到邻近车道的前车速度比当前车道前车速度大,且邻近车道前方的行驶空间,那么只要目标车道的后间隙大于最小安全间隙,主车就会实施换道;规则二与规则一类似,但它规定邻近车道的前车速度比当前车道前车速度大,且比主车速度大,此时邻近车道前方不需要有较大的行驶空间,只要目标车道的前后间隙大于其最小安全间隙,主车就会实施换道;规则三表示如果主车与当前车道前车的时距小于给定的临界值,只要存在空间位移上的优势,车辆就会产生换道的意图.新规则克服了 Nagatani 模型的缺陷,且可解释性更强.

表 1 换道规则表

换道规则	换道需求	换道利益	安全检测
规则一	$v_i < \theta \cdot v_{i-exp}$	$v_{j1} > \tau \cdot v_{i1},$ $(x_{j1} - x_i) \vee v_i > 2f$	$(x_i - x_j) \vee v_j > f$ 隐含 $(x_{j1} - x_i) \vee v_i > f$
规则二	$v_i < \theta \cdot v_{i-exp}$	$v_{j1} > \tau \cdot v_{i1}, v_{j1} > v_i$	$(x_i - x_j) \vee v_j > f,$ $(x_{j1} - x_i) \vee v_i > f$
规则三	$(x_{i1} - x_i) \vee v_i < 2f$ 隐含: $v_i < \theta \cdot v_{i-exp}$	$(x_{j1} - x_i) > \lambda \cdot (x_{i1} - x_i)$	$(x_{j1} - x_i) \vee v_i > f$

当道路的车道数超过两条时,如果满足换道条件的邻近车道数量超过 1,则选择车道变换效益更大的车道换入.车辆变换效益值由速度和位移共同决定,它的表达式可写为

$$\begin{aligned} V^L &= m(v_{j1}^L - v_i) + n(x_{j1}^L - x_i), \\ V^R &= m(v_{j1}^R - v_i) + n(x_{j1}^R - x_i), \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $V^L, V^R$  分别为左边车道和右边车道的变换效益值;  $m, n$  分别为速度优势参数和空间优势参数.

换道规则满足后,进入换道的执行阶段.目前的多数模型没有考虑换道实施过程.然而,实际换道过程中车辆间的相互跟驰关系会发生变化,没有考虑换道实施过程的模型不能很好地反映出换道过程中车辆间的相互影响,更难反映换道对道路通行能力和对整个交通流的影响.

如图 2 所示,换道实施的前半过程中,虽然车辆仍在当前车道上行驶,但此时主车会在保持不与当前车道前车发生碰撞的前提下跟随目标车道前车行驶,而目标车道后车发现主车有换道意图将减速跟随主车行驶.换道实施的后半过程中,由于主车的主

体部分已经离开当前车道驶入了目标车道,主车就被算做目标车道的车辆,跟驰关系恢复正常.假定车辆换道为对称换道,相应地换道时间也分为两段,前一段时间内车辆间的跟驰关系发生变化,当前车道后车和目标车道后车都跟随主车行驶,而此时主车的加速度( $a_i$ )则由当前车道前车和目标车道前车共同决定,它的表达式为

$$a_i = \min \left\{ a_{i1} + \frac{\delta(x_{i1} - x_i - L_{i1}) - \zeta(v_i - v_{i1}) \cdot T}{T^2}, a_{ij1} \right\}. \quad (3)$$

(3) 式大括号中前一表达式为主车与当前车道前车发生碰撞的临界加速度,后一表达式( $a_{ij1}$ )为主车只跟随目标车道前车时的加速度.另外,  $a_{i1}$  为当前车道前车的加速度;  $L_{i1}$  为当前车道前车的车长;  $T$  为换道时间.具体的换道程序设计中,首先检测是否满足换道规则,若满足则车辆被初始化实施换道,然后在  $(0, T/2)$  内车辆跟驰关系发生变化,在  $T/2$  时刻进行换道,使跟驰关系恢复正常.

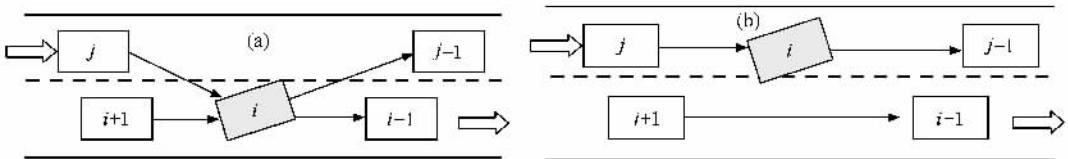


图 2 换道实施前半程(a)和后半程(b)中车辆间的跟驰关系

### 3. 参数标定和模型验证

#### 3.1. 关键参数的标定

车辆换道过程可分解为需求、可行性检测和执行三个步骤.可行性检测是换道需求产生后,主车检测它与目标车道前后车的间隙是否大于最小安全间隙  $f$ ,若大于则实施换道,否则继续检测寻找换道机会.现有研究中最小安全间隙值没有一个统一的规定值,而且不同车辆(或驾驶员)的最小安全间隙是有所差异的.因此,为了更好地模拟车辆的换道行为,最小安全间隙值的参数标定工作不可忽视.本文作者从我国的实际交通情况出发,选择北京的一条快速路基本路段进行实地调研,收集了大量的车辆换道数据,重点分析车辆换道时主车与目标车道前车和后车的两类车头时距值作为换道检测中最小间隙值的参数.

对采集的车头时距数据进行统计分析,可获得换道可行性检测中前时距和后时距的直方图(图 3 和图 4).从图中可以看出,换道可行性检测中的前时距、后时距都近似服从  $N \sim (1.2, 0.2^2)$  的正态分布.现有国内外的文献大多规定换道可行性检测中的最小安全间隙的均值为 1.5—2.0 s,本文根据实际交通调研表明,国内车辆换道的安全间隙临界值比之小,均值约为 1.2 s.更低的安全间隙值必将导致更多的换道机会和更高的换道频率,这也恰好解释了我道路交通中车辆换道行为比国外更为频繁的缘故.

#### 3.2. 模型验证

作者选择北京的某一快速路基本路段进行实地调研,获得密度、速度、流量等基本数据.再根据上一节给出的换道规则,规定仿真步长为 0.1 s,运用 VC++ 语言进行编程,调试通过后,以车辆到达率及其分布的实测值作为仿真的输入值,分别仿真不考

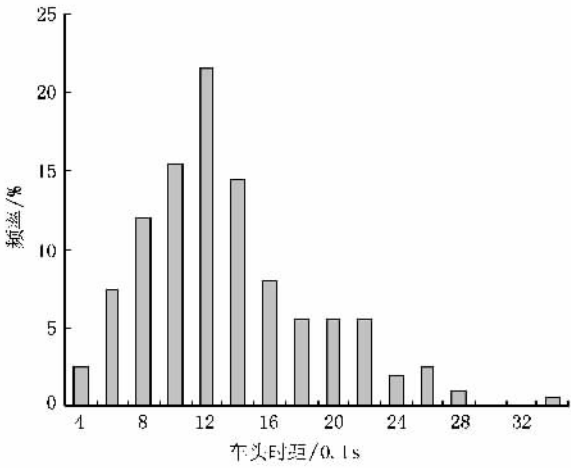


图 3 换道可行性检测中前时距的直方图

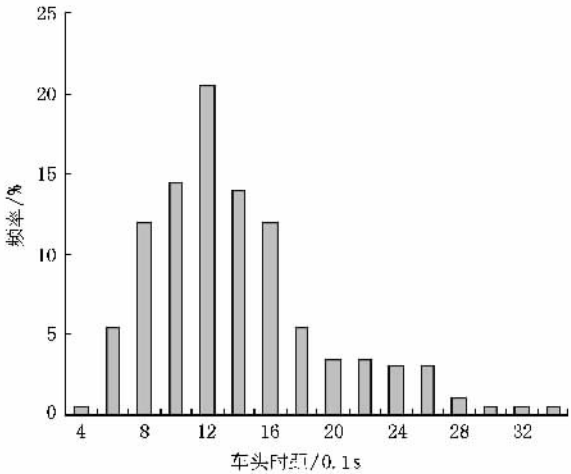


图 4 换道可行性检测中后时距的直方图

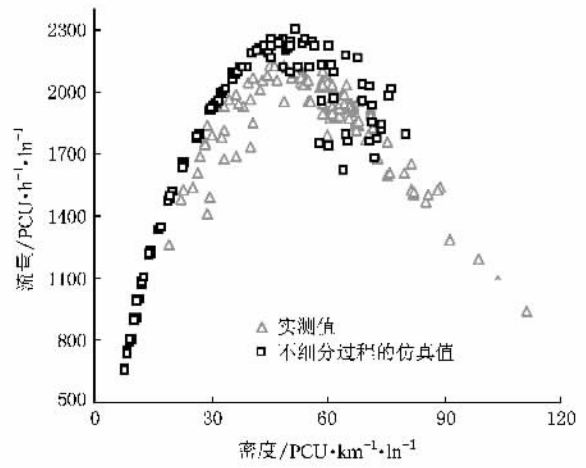


图 5 不考虑换道过程的仿真值与实测值的比较

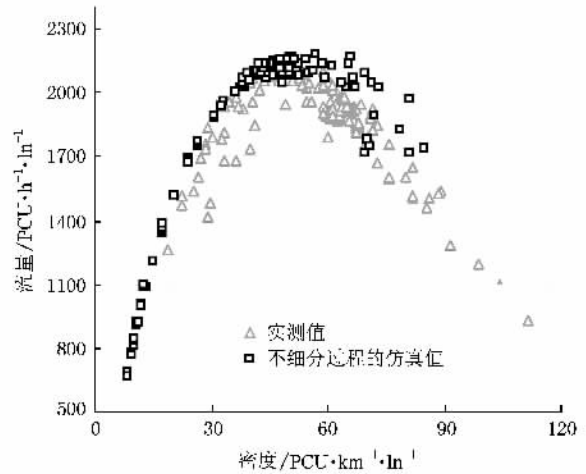


图 6 考虑换道过程的仿真值与实测值的比较

虑换道实施过程的情形和考虑换道实施过程的情形. 输出各自的密度、速度、流量模拟数据. 然后把两种情形下的仿真数据与实测数据进行比较, 可得图 5 和图 6. 图中密度的单位是平均每车道每 km 的标准小汽车数, 简记为  $PCU \cdot km^{-1} \cdot ln^{-1}$ , 流量的单位是平均每车道每 h 的标准小汽车数, 简记为  $PCU \cdot h^{-1} \cdot ln^{-1}$ .

从图 5 和图 6 可知, 考虑换道实施过程的仿真数据与实测数据基本相符, 而没有考虑换道实施过程的仿真数据与实测值有较大差异, 尤其是通行能力(或最大流量)附近的数值明显比实测值高(不考虑实施过程时误差为 6.80%, 考虑过程时误差仅为 1.28%). 这是因为实际换道过程中车辆的跟驰关系会发生变化, 尤其是当交通流趋于饱和时, 目标车道的后车往往有一个持续 2—3 s 的减速过程, 而不考

虑换道实施过程的仿真中不能反映这种持续的减速行为. 因此, 新模型能更好地反映换道对道路交通流的影响.

### 4. 新模型的应用

Yang 和 Zhang<sup>[16]</sup>通过对不同车道数道路的实证研究, 得到道路平均每车道的通行能力随着车道数的增加而呈现边际递减的现象. 然而, 实证方法存在数据采集困难、不易改变和控制交通条件等缺点, Yang 和 Zhang 的实证研究中的样本量也相对较少. 但仿真方法具有可重复性、可延续性等特点, 容易再现复杂交通环境条件下的车流运行特征, 并可弥补观测数据的不足. 因此, 本文运用前面提出的换道模型进行仿真模拟, 来验证不同车道数的道路平均每

车道通行能力的变化规律,并进一步分析它们的交通流特性差异,进而探讨产生差异的原因.

仿真的主要目的是比较不同车道数的道路交通流特性的异同.为此,需要为不同道路间设计相同的输入条件,本文令不同道路的理想期望速度服从  $N \sim (80, 20^2)$  的正态分布,初始速度服从  $N \sim (60, 15^2)$  的正态分布,单位为 km/h.以单向开放边界的基本路段为研究对象,路段全长 2 km.输出方面,主要统计 1 km 处的流量和速度,统计 500 ~ 1500 m 的路段内的密度和换道频率.每次仿真的前 15 min 为测试阶段,这 15 min 的数据不用来分析问题.运用通用语言 VC++ 进行编程,经调试通过后,不断改变交通需求,可得到其速度、密度和流量三参数的关系图.

图 7 为单向两车道、三车道和四车道道路的密度-流量关系图.从图中可知,仿真的通行能力变化趋势与 Yang 和 Zhang<sup>[16]</sup> 的实际观测结果相一致.即在非拥挤阶段不同道路的平均每车道流率没有明显差异,而在拥挤阶段不同道路的平均每车道流率存在显著不同.随着车道数的增加道路的平均每车道通过能力边际递减,且递减率逐渐减小.

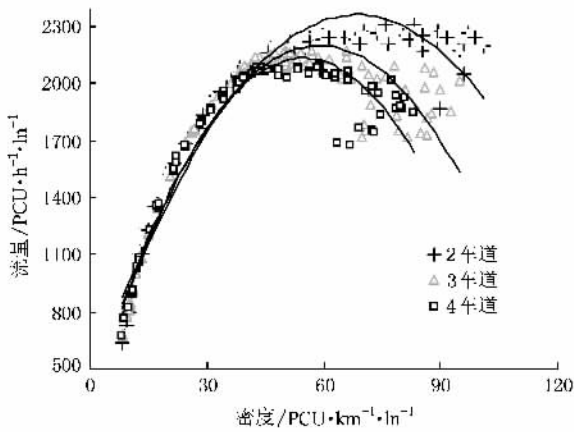


图 7 不同道路的密度-流量关系图

运用模拟方法可较为容易地得出不同道路的密度-速度和流量-速度关系图(见图 8 和图 9).从图中可以看出,在非拥挤阶段,不同道路的三参数关系的差异不明显,而在拥挤阶段却存在显著差异.在拥挤流阶段,相同速度下道路平均每车道的通过量随着车道数的增加而逐渐减少,密度随着车道数的增加也逐渐降低.反映在实际交通中为相同速度下车道数越少的道路上司机能跟驰得更为紧密.

图 10 是不同道路的密度-换道频率关系的仿

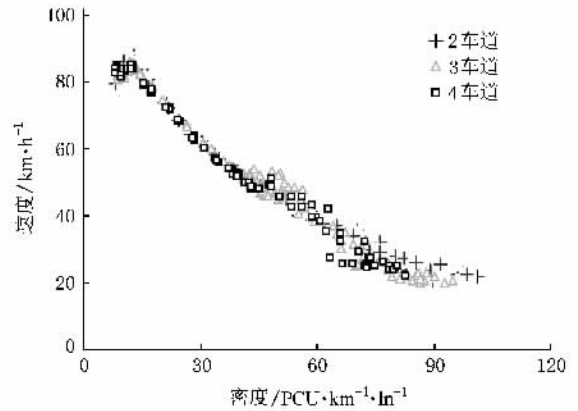


图 8 不同道路的密度-速度关系图

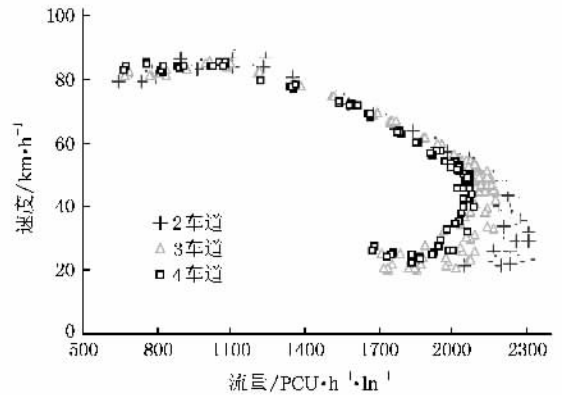


图 9 不同道路的流量-速度关系图

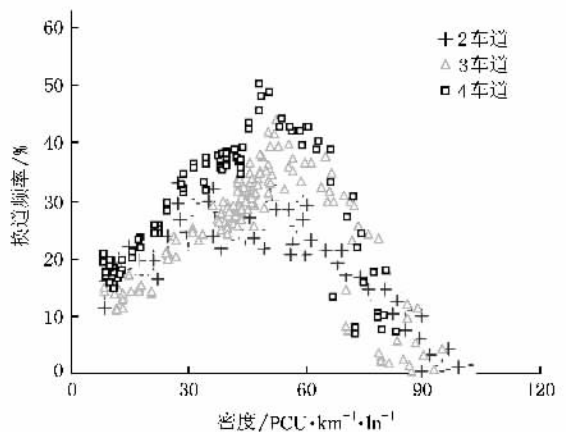


图 10 不同道路的密度-换道频率关系图

真结果.对单条道路而言,各条道路的密度-换道频率关系都呈先增后减的趋势;总体而言,不同道路的换道频率随着车道数的增加而增加.从而可以得出,换道频率的增加使得不同车道车辆间的相互干扰增大,是导致不同道路交通流特性存在差异的主要原

因.另外,当换道模型中不考虑换道的实施过程时,不同(车道数)道路的交通流、速度、密度三参数关系没有明显差异,这说明考虑换道实施过程的新模型更好地反映了车辆间的相互影响.

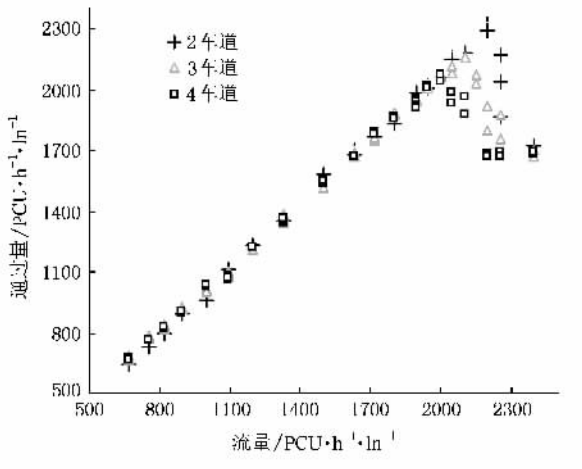


图 11 不同道路的需求-通过量的关系图

图 11 是不同道路的需求-通过量关系的仿真结果.从图中可看出,在交通需求小于  $2000 \text{ PCU} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \ln^{-1}$  时,不同道路的通过量没有明显差别,当需求大于  $2000 \text{ PCU} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \ln^{-1}$  后四车道道路的平均每车道通过量开始下降,但二、三车道的道路仍能上升;当需求增加到  $2100 \text{ PCU} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \ln^{-1}$  后,三车道道路的平均每车道通过量也开始下降,但两车道道路的通

过量仍能上升,直至当需求为  $2200 \text{ PCU} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \ln^{-1}$  后才开始下降.这些变化趋势表明不同道路平均每车道所能承担的最大需求量随着车道数的增加而下降.

## 5. 结 论

本文在 Nagatani 换道模型的基础上,提出了一种新模型.新模型用时距检测代替间距检测,且把换道实施过程细分为两个阶段,不同阶段车辆间的跟驰关系及其对交通流的影响有所差异.并从我国实际交通出发,标定了换道可行性检测的关键参数——最小安全间隙值.仿真结果表明新模型与实测值更为吻合,更能反映换道对道路交通流的影响.把新模型运用到不同车道数的道路交通流特性的比较中,发现不同道路平均每车道通行能力随着车道数的增加而呈现边际递减趋势,这一结果与 Yang 和 Zhang 的实测结果相一致.进一步分析可以得出,在非拥挤阶段不同道路的三参数关系差异不明显,而在拥挤阶段却存在显著差异.另外,平均每车道换道频率的增加使得相邻车道间车辆的相互干扰增大是导致不同道路交通流特性存在差异的主要原因.研究结果有助于深入刻画车辆的换道行为,以及正确认识不同车道数的道路交通流特性的异同.

[1] Huang H J 1994 *Urban Transportation Network Analysis Theory and Practice* (Beijing: China Communication Press) (in Chinese) [黄海军 1994 城市交通网络平衡分析理论与实践(北京:人民交通出版社)]

[2] Gipps P G 1986 *Transp. Res. B* **20** 403

[3] Yang Q, Koutsopoulos H N 1996 *Transp. Res. C* **4** 113

[4] Hidas P 2002 *Transp. Res. C* **10** 351

[5] Nagatani T 1994 *Physica A* **202** 449

[6] Nagai R, Nagatani T, Taniguchi N 2005 *Physica A* **350** 548

[7] Nagatani T 2003 *Physica A* **318** 537

[8] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221

[9] Lei L, Dong L Y, Song T, Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷丽、董力耘、宋涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]

[10] Chen X, Gao Z Y, Zhao X M, Jia B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2024 (in Chinese) [陈漩、高自友、赵小梅、贾斌 2007 物理学报 **56** 2024]

[11] Shang H Y, Huang H J, Gao Z Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4342 (in Chinese) [尚华艳、黄海军、高自友 2007 物理学报 **56** 4342]

[12] Teng Y F, Gao Z Y, Jia B, Li F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1365 (in Chinese) [滕亚帆、高自友、贾斌、李峰 2008 物理学报 **57** 1365]

[13] Daganzo C F 1997 *Transp. Res. B* **31** 83

[14] Daganzo C F 2002 *Transp. Res. B* **36** 131

[15] Laval J A, Daganzo C F 2006 *Transp. Res. B* **10** 251

[16] Yang X B, Zhang N 2005 *Proceedings of the Sixth Eastern Asia Society for Transportation Studies Conference*, September, Bangkok 739

# A lane-changing model considering the maneuver process and its applications<sup>\*</sup>

Yang Xiao-Bao<sup>†</sup>

(*School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 22 May 2008; revised manuscript received 17 July 2008)

## Abstract

An improved lane-changing model based on the Nagatani's method is proposed. The threshold of the safety headway in lane-changing process is calibrated. Both the lane-changing process and the impact of the lane-changing vehicle on the adjacent vehicles are incorporated into the proposed model. Therefore, simulated results using the proposed model agree with the surveyed results. The marginal decrease of lane capacity with the number of lanes is analysed and validated upon the proposed lane-changing model. We find that the vehicle velocity decreases and the lane changing probability increases with the increasing number of lanes under the congested condition of highways in cities.

**Keywords** : lane changing model, time of lane change, number of lanes, highway capacity

**PACC** : 0550, 0520

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705503) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70521001).

<sup>†</sup> E-mail : yangxiaobao@jtys.bjtu.edu.cn