

文章编号: 1001-7372(2007)05-0106-06

# 基于超车行为的双车道公路通行能力分析

刘江<sup>1,2</sup>, 邵长桥<sup>1</sup>, 荣建<sup>1</sup>, 任福田<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100022; 2. 河南省交通厅, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 为了研究双车道公路上的超车行为, 定义了可回车车头时距与可超车车头时距, 通过超车试验得到了两者的临界间隙值; 分析了单向、双向车道的最小通行能力, 合理解释了双向车道通行能力值小于2倍单向车道通行能力值的原因; 最后确定了中国双车道公路上跟车车头时距值和跟车率。结果表明: 根据实测数据及拟合仿真试验得到的双车道公路的基本通行能力为  $3\,000\text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

**关键词:** 交通工程; 双车道公路; 超车试验; 通行能力; 可接受间隙; 跟车率

**中图分类号:** U491.254

**文献标志码:** A

## Analysis of Two lane Highway Traffic Capacity Based on Overtaking Behavior

LIU Jiang<sup>1,2</sup>, SHAO Chang qiao<sup>1</sup>, RONG Jian<sup>1</sup>, REN Fu tian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Traffic Engineering of Beijing City, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Communications Department of Henan Province, Zhengzhou 450052, Henan, China)

**Abstract:** In order to research overtaking behavior on two lane highways, the returnable time headway and the overtakable time headway were defined and their critical gap values were attained according to overtaking experiment. The minimum traffic capacity of one lane highway and two lane highway were theoretically analyzed, and the reason that two lane highway traffic capacity is smaller than twice as that of one lane was explained rationally. Finally, the following time headway and following rate of two lane highways in China were confirmed. Results show that according to the field data and fitting simulation experiment, the basic traffic capacity on two lane highways is  $3\,000\text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ .

**Key words:** traffic engineering; two lane highway; overtaking experiment; capacity; acceptable gap; following ratio

## 0 引言

通行能力是指在特定的道路条件、交通条件、控制条件以及环境条件下单位时间内能通过公路设施断面的最大交通量, 它可以反映道路疏导交通的能力。研究通行能力可以为公路网规划、可行性研究、公路设计、公路建设后评价等方面提供科学的理论依据<sup>[1-7]</sup>。

双车道公路是中国公路网中的主要形式, 其重要特点是超车车辆必须驶入对向车道才可以完成超车过程。由于双车道公路上车辆的运行特点与多车道公路上车辆的运行特点不同, 所以在分析双车道公路通行能力时, 需要把双向车道作为整体考虑。道路上出现超车现象, 说明交通流未达到道路的通行能力状态, 因此, 研究双车道公路上的超车行为可以从另一个角度来分析道路的通行能力。

收稿日期: 2006-12-05

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2003-318-223-09)

作者简介: 刘江(1974-), 男, 河南许昌人, 工学博士, E-mail: liuj999@hncd.gov.cn

美国对通行能力研究得最系统、最深入, 世界上大多数国家对道路通行能力的研究往往是借鉴美国的方法, 然后再根据本国的交通特点来修订和完善的<sup>[8,9]</sup>。美国《道路通行能力手册》(后文简称 HCM) 是通行能力研究领域的经典著作, 迄今为止共出版了 4 个版本。1950 年和 1965 年版本中根据实际观测的交通量, 将单、双车道的通行能力值都定义为  $2\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 1985 年第 3 版中推荐单向车道的通行能力为  $2\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ , 双向车道的通行能力为  $2\,800\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 2000 年最新版本中则认为单向车道的通行能力为  $1\,700\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ , 双向车道的通行能力为  $3\,200\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 。而中国“九五”双车道公路通行能力研究中将双车道公路的通行能力定义为  $2\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ , 在方向分布系数为 0/100 时 (单向车道) 的通行能力为  $1\,900\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

从以上研究中可以发现一个非常有趣的现象: 双车道公路上双向车道的通行能力值都小于 2 倍单向车道通行能力值, 然而各国的研究中对产生这种现象的原因都没有给出合理的解释。另外, 中国“九五”通行能力研究中推荐的双车道公路通行能力值已经 10 a 之久, 随着中国机动化程度、车辆机动性能力的提高, 双车道公路的通行能力值也应该有所变化。

# 1 双车道公路上的超车行为

## 1.1 超车原因和机理

驾驶员在公路上都希望保持自己的期望速度驾驶机动车, 但因为交通组成复杂, 不同车辆类型和驾驶员个性的差异, 导致了人车单元的期望速度有很大差别<sup>[10,12]</sup>, 其中一部分车辆速度较慢, 一部分车辆速度较快。当较快车辆处于较慢车辆的后面时, 较快车辆希望保持自己的期望速度, 就产生了超车需求。具有超车需求的车辆, 当发现对向车道交通流中和本向车道车辆间具有一定间隙时, 开始驶入对向车道进行超车, 超车完毕后重新返回到原车道<sup>[13]</sup>。

可见, 双车道公路上超车行为的实现主要有 2 个方面原因: 一是车辆间产生速度差, 车辆有超车需求; 另一个是对向车道交通流和本向车道车辆间能够提供可以超车和可以回车的能力。当超车需求和超车能力同时存在时, 车辆可以完成超车行为<sup>[14]</sup>。

## 1.2 超车过程中的可接受间隙

超车过程如图 1 所示。车辆  $n+1$  和车辆  $n+2$  分别表示前车和头车, 车辆  $n$  为要超车车辆, 车辆  $m$  为对向来车, 前车和头车之间的车头时距定义为可

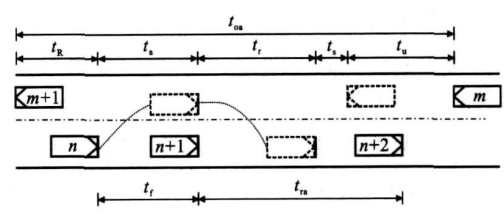


图 1 可超车间隙与可回车间隙  
Fig. 1 Overtakable Gap and Returnable Gap

回车车头时距  $t_a$ , 车辆  $m+1$  和车辆  $m$  之间的车头时距定义为可超车车头时距  $t_{oa}$ 。图 1 中,  $t_R$ 、 $t_a$ 、 $t_r$ 、 $t_s$ 、 $t_u$ 、 $t_f$  分别为反应时间、加速时间、回车时间、安全距离情况下的行驶时间、均速行驶时间及跟车时间。

当车辆  $n$  超车时, 由于对向来车  $m$  的影响, 其不可能长时间占用对向车道, 必须在车辆  $m$  到来之前安全插入到前车  $n+1$  和头车  $n+2$  之间的空隙中。当对向车道提供了足够的可超车车头时距而本向车道没有可以回车的车头时距时, 车辆  $n$  同样不敢贸然超车。一般研究中只考虑了可超车车头时距, 而没有考虑可回车车头时距, 因而对双车道公路超车行为的研究是不完善的。

# 2 超车试验方案

超车试验采用高精度车载 GPS 进行数据采集, 试验中共需要 3 台动态 GPS, 分别安装于超车车辆  $n$ 、前车  $n+1$  及头车  $n+2$  上。

## 2.1 可回车车头时距

车头时距  $t$  表示同一方向连续驶过的两车通过道路上同一点的时间间隔, 即

$$t = \frac{L}{v} \tag{1}$$

式中:  $L$  为前后车的间距;  $v$  为后车的速度。

试验时, 装有动态 GPS 的试验车辆按图 1 所示的排列方法列队行驶, 前车和头车首先保持相同的速度和一定的车头间距, 与此同时, 后面跟随行驶的超车车辆试图超越前车, 并插入到前车和头车之间的空隙中去。在超车车辆实施超车行为时, 对每个超车状态进行记录, 包括开始超车时的时刻, 插入间隙成功或插入间隙失败时的时刻, 以及插入间隙成功后驾驶员的感受情况等。

中国“九五”通行能力研究表明, 在设计速度为  $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  的双车道公路上, 达到道路通行能力值的车速范围为  $40\sim50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ <sup>[15]</sup>, 所以试验车速选择为  $20\sim60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , 试验车速级差为  $5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , 覆盖了达到道路通行能力时的车流速度。同时, 可回车车头间距的选择分为 10 档, 最小为小于

10 m, 其次为 10 m, 然后以 5 m 为步长增加, 直到 50 m。另外, 最小车头间距的选择与车速有关, 应根据驾驶员在不同车速条件下所能接受的最小安全间隔来进行调整。这样, 在每组不同的车速和间距条件下, 共做 10 次超车试验, 则对于每位试验驾驶员来说, 需做  $10 \times 9 \times 10$  共 900 次超车试验。随着前车速度及前车与头车间距的变化, 超车驾驶员对插入间隙过程有着不同的感受, 试验中将其分为非常困难、困难、一般、容易和非常容易 5 个级别。根据试验结果, 绘制出可回车车头时距和前车速度的关系, 如图 2 所示。

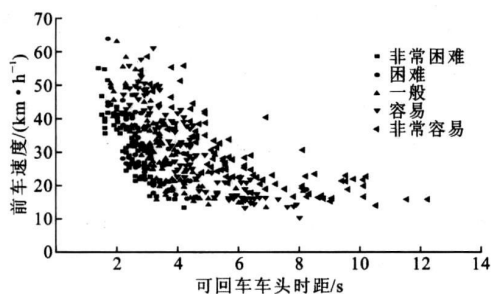


图 2 按驾驶员感受度划分的可回车车头时距和前车速度的关系

Fig. 2 Relation of Returnable Time Headway and Front Vehicular Speed According to Driver Perception

## 2.2 可超车车头时距

可超车车头时距的组成比可回车车头时距的组成复杂得多, 但是本文中并不关心其各组成部分的具体数值, 只需要一个总体值即可。试验时试验人员在车辆行驶过程中用录像机记录车辆的整个运动过程, 包括车辆的跟驰阶段、超车阶段和回车阶段, 同时记录对向来车的情况以及不能超车的情况。

## 3 单向、双向车道通行能力理论分析

### 3.1 可接受间隙的临界值

可回车车头时距和可超车车头时距是可接受间隙, 可以用可接受间隙理论的临界值法和 Logit 方法来计算两者的临界值。

对不同车头时距下的接受频数和拒绝频数进行统计, 得到某车头时距时的接受频率和拒绝频率。由于驾驶员的气质类型不同, 对可回车过程的感受也不尽相同; 同时, 所有驾驶员均认为如果事先不告知试验目的和方案的话, 其在感受为非常困难和困难的时候是不会贸然采取回车行为的, 因此, 在后期数据处理时, 将驾驶员感受为非常困难和困难的接受行为视为拒绝行为。

用 Logit 方法得到可回车车头时距的可接受间隙临界值为 2.79 s, 临界值法得到的可接受间隙临界值为 2.84 s, 见图 3, 最终确定可回车车头时距的临界间隙值  $t_{rac}$  为 2.8 s。用同样的方法和步骤得到可超车车头时距的临界间隙值为 8.0 s。

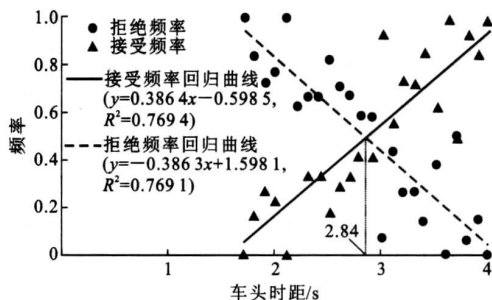


图 3 用临界值法计算的可接受间隙临界值

Fig. 3 Acceptable Gap Critical Value Calculated by Critical Method

### 3.2 方向分布系数为 0/100 时的最小通行能力

按照对道路通行能力定义的理解, 有超车现象时, 道路未达到通行能力; 交通流中无超车现象时, 道路才有可能达到通行能力状态。可接受间隙理论说明, 当车头时距小于临界间隙值时, 可以认为超车或回车失败, 大于该值时可以认为超车或回车成功。因此, 可超车车头时距和可回车车头时距的临界间隙值能够用来分析双车道公路的通行能力。

当方向分布系数为 0/100 时, 如图 4 所示, 对向车道无车辆, 控制车辆超车行为的是可回车车头时距临界间隙值, 当所有车辆都以该临界间隙值行驶时, 所有的车辆都不能实施超车行为, 达到了理论条件下的单向车道通行能力, 其值  $C_{0/100} = 1\,286 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

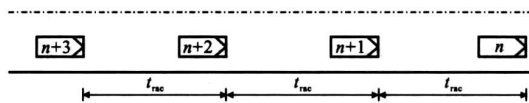


图 4 方向分布系数为 0/100 时的最小通行能力

Fig. 4 Minimum Traffic Capacity with Direction Distribution Coefficient of 0/100

由于临界间隙值表示的只是在该值时, 驾驶员可以回车和不可以回车的概率相等, 实际交通流中会存在小于该临界间隙值的车头时距, 因而用临界间隙值计算得到的通行能力只能是理论分析时的最小通行能力, 即双车道公路上单向车道的理论最小通行能力值应该为  $1\,286 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 3.3 方向分布系数为 50/50 时的最小通行能力

同理, 当方向分布系数为 50/50 时, 如图 5 所

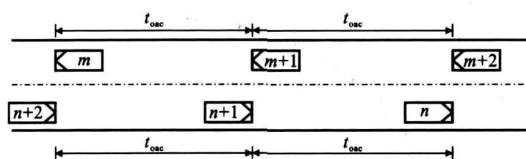


图5 方向分布系数为50/50时的最小通行能力

Fig. 5 Minimum Traffic Capacity with Direction Distribution Coefficient of 50/50

示,控制双车道公路超车行为的关键因素变为了可超车车头时距临界间隙值  $t_{oac}$ ,而不是可回车车头时距临界间隙值。这是因为:虽然本向车道路上有大于可回车车头时距临界间隙值的空当,但是由于对向车道交通流中不提供可以超车的车头时距,车辆还是无法利用对向车道超车而插入到前方空当中。因此,当道路上全部车辆都保持在可超车车头时距临界间隙值时,道路上无超车现象,此时达到了理论条件下双向车道的最小通行能力值,其值  $C_{50/50} = 900 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。即当方向分布系数变为50/50时,计算得到的双向车道最小通行能力值只有  $900 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,小于单向车道的最小通行能力值。

根据单向、双向车道最小通行能力的理论分析可知,由于交通流中人车单元期望速度不同,期望速度较低的车辆与期望速度较高的车辆间会存在大于可回车车头时距临界间隙值的车头时距,而由于对向车道不提供可超车车头时距,跟车行驶且有超车需求的车辆无法超越慢速车辆而插入前方空当,造成了车头时距的损失,从而降低了双车道公路整体的通行能力,这就是双向车道通行能力值小于2倍单向车道通行能力值的主要原因,其实质还是由于双向交通流的互相干扰。

## 4 双车道公路的基本通行能力

第3节的分析说明,双车道公路达到通行能力时,交通流中因为人车单元的差异必然存在一部分较大的车头时距,美国 HCM 2000 的研究也说明了这一问题,式(2)为小客车当量流量  $q_{pc}$  和跟车时间百分比  $P_{TSF}$  的关系

$$P_{TSF} = (1 - e^{-0.000879q_{pc}}) \times 100\% \quad (2)$$

由式(2)计算得,通行能力达到  $3200 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  时,跟车时间百分比为  $94\%$ ,而不是  $100\%$ 。

由于跟车时间百分比的定义比较模糊,因此笔者根据中国的实际情况将其定义为跟车率,即双车道公路上处于跟驰状态的车辆占有所有车辆的比例,其值等于交通流中车头时距小于某值时的车辆比

例。跟车率和流量有密切的关系,通过该关系可以得到双车道公路的基本通行能力值。

计算跟车率需要首先解决2个非常重要的问题:①确定判断跟驰行驶的车头时距,即车辆的车头时距为多大时可以认为车辆处于跟驰行驶状态;②确定达到通行能力时交通流中的跟车率。

### 4.1 跟车车头时距

美国利用仿真程序 TWOPAS 得到跟车车头时距为  $3 \text{ s}$ ,这一结论没有实测数据支持,缺乏有力的证明;中国“九五”通行能力研究中根据前后车速度差的关系确定了跟车车头时距值为  $6 \text{ s}$ ,该值不仅明显偏大而且适用性极差<sup>[9]</sup>。因为在超车试验中,驾驶员明显感受到在车头时距大于  $4 \text{ s}$  时,车辆的速度选择有很大的自主性,处于自由行驶状态。

车辆列队行驶时,如果两车之间能够安全地穿插进另一车辆,那么这两车中的后车显然没有有效利用道路时空资源,其行驶状态不可能受到前方车辆的阻碍和制约,即这辆车不是处于被动跟驰行驶状态,而是处于自由行驶状态。相反,两车之间无法穿插进另一车辆,说明后车的行驶状态必然受到了前车的影响和制约,属于跟驰行驶状态。因此,可回车车头时距临界间隙值可以作为判断车辆是否处于跟驰状态的依据,同时考虑到未来研究的统一性,将跟车车头时距定义为  $3 \text{ s}$ 。

### 4.2 达到通行能力时的跟车率

根据单向、双向车道最小通行能力的理论分析以及美国 HCM 2000 的相关研究等可以推知:中国双车道公路上交通流达到通行能力时的跟车率必然也不可能达到  $100\%$ 。

由于双车道公路缺乏大流量的交通状态,无法得到通行能力时的跟车率,因此,借鉴 HCM 2000 的研究成果,利用实测数据回归得到的关系模型计算跟车率为  $0.91 \sim 0.95$  时的通行能力。

### 4.3 通行能力

根据第4.1、4.2节中确定的跟车车头时距和达到通行能力时的跟车率,对在河南、河北和北京近郊采集到的双车道公路交通流数据进行处理,以  $5 \text{ min}$  为统计间隔对车流量和跟车率进行汇总,得到当量流量与跟车率之间的关系,如图6所示。

将当量流量与跟车率  $d$  的关系分别用线性方程和负指数函数曲线方程进行回归,回归结果如表1所示。

将跟车率为  $0.91 \sim 0.95$  分别代入表1中2个回归模型,得到不同跟车率时的当量流量,如表2所示。

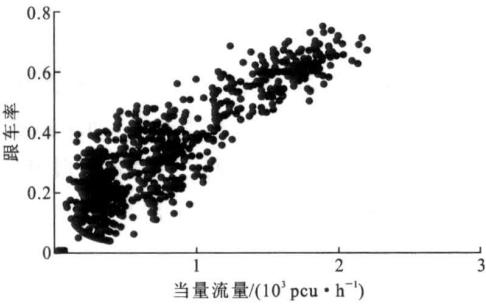


图 6 当量流量与跟车率的关系

Fig. 6 Relation of Equivalent Volume and Following Ratio

表 1 当量流量与跟车率关系的 2 种回归结果

Tab. 1 Two Regression Results of Relation for Equivalent Volume and Following Ratio

回归类型	回归模型	相关系数 $R^2$
线性函数	$d=0.000\ 3\ q_{pc}+0.092\ 1$	0.762
负指数函数	$d=1-e^{-0.000\ 944\ q_{pc}}$	0.492

表 2 不同跟车率下计算的当量流量

Tab. 2 Calculated Equivalent Volumes Under Different Following Ratios

跟车率		0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
当量流量 / ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ )	线性函数	2 726	2 760	2 793	2 826	2 860
	负指数函数	2 551	2 676	2 817	2 980	3 173

从表 2 可以看出:不同跟车率下计算出的当量流量处于 2 800~3 200  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,即中国双车道公路通行能力应该在 2 800~3 200  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$  范围内。考虑到中国今后机动车性能会进一步提高,小客车比重会进一步增大,最终以 0.94 作为确定通行能力时的跟车率,并推荐中国双车道公路基本路段的通行能力为 3 000  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

5 仿真模型验证

为了进一步证明用上述方法得到的双车道公路通行能力值是否准确,笔者使用仿真程序 TWOSIM 对其进行验证。仿真道路为标准的二级双车道公路的平直路段<sup>[17]</sup>,行车道宽度 9 m,路肩宽度 1.5 m,侧向净空 1 m;交通条件为 100%小客车,50/50 的方向分布系数以及 100%男性驾驶员。仿真流率从双向 100  $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$  开始,以 100  $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$  为步长增大至 3 200  $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$ ,仿真中统计跟车率时使用的跟车车头时距为 3 s。图 7 为根据仿真结果得到的当量流量与跟车率数据。

对仿真结果用负指数函数进行拟合,得

$$d=1-e^{-0.000\ 999\ 5q}, R^2=0.993 \tag{3}$$

式中,  $q$  为仿真流量。

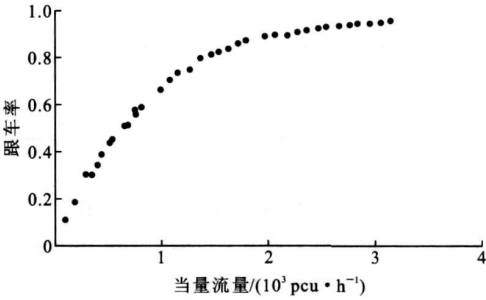


图 7 当量流量与跟车率仿真结果

Fig. 7 Simulation Results of Equivalent Volume and Following Ratio

将不同的跟车率代入式(3),可得到不同跟车率下的仿真流量,见表 3。表 3 中数据与通过实测数据得到的通行能力非常接近。

表 3 不同跟车率时的仿真流量

Tab. 3 Simulation Volumes Under Different Following Ratios

跟车率	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
流量 / ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ )	2 409	2 527	2 661	2 815	2 997

6 结 语

- (1)通过实测数据的拟合及仿真试验的验证,可以得到中国双车道公路的基本通行能力为 3 000  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 。
- (2)由于缺乏大流量的试验数据,因此选取的跟车率等数值是根据经验得到的,缺乏大流量数据的验证,相关参数需要在今后的研究中继续采集相关数据或运用驾驶模拟舱等试验手段来进一步确定。

参考文献:

References:

[ 1 ] 张亚平,裴玉龙.道路通行能力研究现状及发展综述[ J ].交通运输工程学报,2002,2(2):94-97.  
ZHANG Ya ping, PEI Yu long. Overview of Development and Current Situation on Highway Capacity Research[ J ]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2):94-97.

[ 2 ] 周伟,王秉纲.路段通行能力的理论探讨[ J ].交通运输工程学报,2001,1(2):92-98.  
ZHOU Wei, WANG Bing gang. Theoretical Study About Road Section Capacity[ J ]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2):92-98.

[ 3 ] 王炜.城市交通管理规划方案设计技术[ J ].交通运输工程学报,2003,3(2):57-60.  
WANG Wei. Scheme Design Technique of Urban Traffic Management Planning[ J ]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2):57-60.

- [ 4 ] 王颖,谢海红. 基于路网规划的道路立体交叉交通量预测方法[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 106 109.  
WANG Ying, XIE Hai hong. Traffic Volume Forecasting Method at Road Interchange Based on Road Network Planning[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 106 109.
- [ 5 ] 张建嵩, 陈建阳, 孙立军. 城市道路中的通道控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 95 99.  
ZHANG Jian song, CHEN Jian yang, SUN Li jun. Traffic Corridor Control Model of Urban Road[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 95 99.
- [ 6 ] 许良, 高自友. 基于路段能力可靠性的城市交通网络设计[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 86 90.  
XU Liang, GAO Zi you. Urban Transport Network Design Based on Link Capacity Reliability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 86 90.
- [ 7 ] 李文权, 王莉, 王炜. 高速公路上匝道合流区通行能力经验模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 80 84.  
LI Wen quan, WANG Li, WANG Wei. Empirical Highway Capacity Model of On ramp Junction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 80 84.
- [ 8 ] LUTTINEN R T. Traffic Flow on Two lane Highways – an Overview[R]. Lathti: TL Consulting Engineers Ltd 2001; 13 18.
- [ 9 ] HARWOOD D W, MAY A D, ANDERSON I B, et al. Capacity and Quality of Service of Two lane Highways – Final Report[R]. Berkeley: University of California, 1999; 5 15.
- [ 10 ] 刘江, 田萍, 荣建, 等. 驾驶员气质与行车速度关系的初步研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(1): 27 32.  
LIU Jiang, TIAN Ping, RONG Jian, et al. Initial Research on Relationship Between Drivers' Temperament and Travel Speed[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(1): 27 32.
- [ 11 ] 荣建, 刘小明, 任福田, 等. 基于可变跟驰时间和随机因素的通行能力理论计算模型[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 81 85.  
RONG Jian, LIU Xiao ming, REN Fu tian, et al. Theoretic Capacity Model Considering with Variable Following Time and Random Factors[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 81 85.
- [ 12 ] 魏朗, 高丽敏, 余强, 等. 驾驶员道路安全感受模糊评判模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 102 105.  
WEI Lang, GAO Li min, YU Qiang, et al. Fuzzy Evaluating Model of Driver's Road Safety Perception[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 102 105.
- [ 13 ] 陈洪仁, 杨龙海, 赵国锋. 寒冷地区二级公路路段交通微观仿真研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 90 92.  
CHEN Hong ren, YANG Long hai, ZHAO Guo feng. Research on the Traffic Simulation of Second Class Highway in Cold Area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 90 92.
- [ 14 ] 魏丽英, 隗志才, 田春林. 驾驶员车道变换行为模拟分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 77 80.  
WEI Li ying, JUAN Zhi cai, TIAN Chun lin. Simulation Analysis of Driver's Lane changing Behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 77 80.
- [ 15 ] 交通部公路科学研究所. 一般双车道公路通行能力研究分报告[R]. 北京: 交通部公路科学研究所, 2000; 49 54.  
Highway Research Institute of Ministry of Communications. Study of Two lane Highway Traffic Capacity in China[R]. Beijing: Highway Research Institute of Ministry of Communications, 2000; 49 54.
- [ 16 ] 刘江, 吕庆丰. 山区双车道公路延误车头时距分析[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(5): 476 480.  
LIU Jiang, LU Qing feng. Analysis of Delay Headway on Two lane Highways on Mountainous Areas[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(5): 476 480.
- [ 17 ] 陈宽民, 严宝杰. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 25.  
CHEN Kuan min, YAN Bao jie. Analysis of Road Traffic Capacity[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 25.