

# 公路平曲线参数对车辆轨迹和速度的影响规律

彭其渊<sup>1</sup>, 徐进<sup>1,2</sup>, 罗庆<sup>2</sup>, 邵毅明<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有  
限责任公司, 四川 成都 610031; 3. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘要:** 为得到弯道几何参数对切弯时车辆轨迹和速度的影响, 构建了切弯效用的量测指标——曲中速度增量和曲中轨迹半径增量, 然后用“公路—驾驶人—车辆”仿真系统模拟了跟弯和切弯 2 种模式下的弯道行驶过程, 得到了弯道转角、半径、路幅宽度、弯道长度与切弯效用之间的关系曲线, 结果表明: ①切弯效用在转角  $\Delta A = 20^\circ$  时最大, 然后随着  $\Delta A$  增加而迅速衰减。②对于低于  $10^\circ$  的小转角弯道, 即使是跟弯行驶, 轨迹半径仍大于弯道半径, 只有  $\Delta A > 20^\circ$  时, 轨迹半径才会与弯道半径一致。③存在一个临界转角  $\Delta A_{oc}$ , 当  $\Delta A < \Delta A_{oc}$  时, 路宽的增加才会提高切弯效用。④转角一定的情况下, 切弯效用随弯道半径的增加而衰减, 并且转角越大, 衰减越迅速。⑤对于 30 m 半径的急弯, 不管路宽和转角取何值, 切弯都可以提高通过速度。⑥切弯效用随弯道长度的增加而减小, 弯道长度超过临界值时, 切弯效用为零。

**关键词:** 线形设计; 平曲线; 切弯; 车辆轨迹; 速度

**中图分类号:** U 412. 33; U 491. 25

**文献标识码:** A

roadway width  $W_R$ , curve length  $L_h$  and cutting effectiveness were analyzed. The results show that cutting effectiveness reaches maximum at  $\Delta A = 20\text{deg}$ , and it would decline as  $\Delta A$  increase. For curves with  $\Delta A$  less than  $10\text{deg}$ , track radii in curve areas is larger than the curve radii even from lane following pattern. And only when  $\Delta A$  exceeds  $20\text{deg}$ , track radii can be in accordance with curve radii. There exists a critical angle  $\Delta A_{oc}$ , widening the pavement can result in an increase in cutting effectiveness only when  $\Delta A < \Delta A_{oc}$ . Cutting effectiveness would decline as curve radii increase, and the larger  $\Delta A$ , the faster in decline. For curves with 30 m radii, no matter how a  $\Delta A$  and  $W_R$  it has, an obvious speed increment can be gained by cutting. Cutting effectiveness would decrease as  $L_h$  increase, when  $L_h$  exceeds a critical length, the effectiveness being zero.

**Key words:** alignment design; horizontal curves; curve cutting; track; speed

## Effect of Horizontal Curves Design on Track and Speed of Passenger Car

PENG Qiyuan<sup>1</sup>, XU Jin<sup>1,2</sup>, LUO Qing<sup>2</sup>, SHAO Yiming<sup>3</sup>

(1. College of Transportation & Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chengdu 610031, China; 3. Department of Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** To obtain the effect of change in design elements of curves on vehicle' track and speed while driving in curve cutting, two indexes were established to measure cutting effectiveness, i. e. speed increment and track radii increment at mid-curve. Then, process of a car driving in curve cutting and lane keeping pattern on test curves was simulated by a “roadway — driver — vehicle” virtual driving system. And the relationships among curve radii  $R$ , deflection angle  $\Delta A$ ,

了解车辆在弯道上的行驶轨迹和速度可以帮助设计者得到更安全、更能满足人车特性的公路线形。目前在设计公路路线时是假定车辆轨迹与平面线形一致, 但在实际的驾驶过程中, 只有在行驶通道很窄的情况下, 车辆轨迹才会贴近行车道中线<sup>[1]</sup>。而路面较宽时, 驾驶人有充分机会在通道范围内选择不同的行驶路径, 技术娴熟的或是偏爱高速的驾驶人会选择“切弯”行驶方式<sup>[2-4]</sup>。切弯时的轨迹曲率半径可能会明显大于弯道设计半径, 轨迹将变得舒缓, 驾驶人会选择较高的通过速度。这就带来一个问题, 即实际的过弯速度与按弯道设计半径算得的运行速度或者临界速度不一致。所以, 若要实现设计控制, 必须去了解弯道上的切弯行为及其发生规律, 特别是切弯效用与平曲线设计参数之间的关系。

收稿日期: 2010-11-12

基金项目: 国家博士点基金(20060613023); 交通运输工程重庆市重点实验室开放基金(2008CQJY001)

第一作者: 彭其渊(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统、运输组织。

E-mail: qiyuan-peng@swjtu. edu. cn

通讯作者: 徐进(1977—), 男, 工学博士, 主要研究方向为路线设计理论、人车路协同设计方法。E-mail: xj996699@163. com

为此,本文将分析在哪种参数组合下驾驶人会选择跟弯,在哪种参数组合下驾驶人会倾向于切弯,切弯时的弯道通过速度及切弯后的轨迹曲率等一系列对公路线形设计来讲非常关键的问题。

## 1 研究手段

使用行驶动力学仿真方法来模拟驾驶人的切弯行驶过程,从仿真输出中提取车辆在弯道上的轨迹和速度进行切弯效用分析。为此,建立了“公路-驾驶人-车辆”行驶仿真系统。

### 1.1 车辆动力学模型

在各种车型中,小客车对行驶速度最敏感,也是切弯最多的车型,所以将其作为仿真车辆。用 ADAMS 软件建立一辆小客车的动力学模型,如图 1 所示。需要说明的是,行驶过程中的车辆动力学和运动学解算是在 ADAMS/Car 环境下完成的。

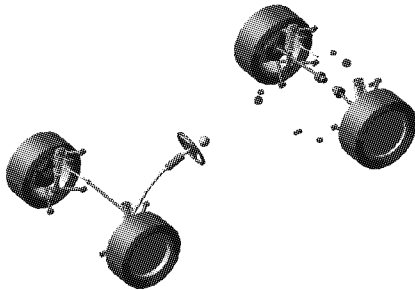


图1 小客车的动力学模型

Fig.1 Dynamics model of passenger car

### 1.2 3D 路面生成模块

该模块的功能是生成能够与轮胎力学模型发生作用进而支撑车辆行驶并能被 ADAMS/Car 识别的路面模型文件<sup>[5]</sup>,包括路面节点的三维坐标、每个三角路面单元的附着系数和组成节点序号、路面单元之间的拓扑关系等。由于节点坐标是三维的,所以路面模型也是空间三维的,如图 2。



图2 三维的路面模型

Fig.2 Spatial road surface model

### 1.3 驾驶人模块(方向和速度控制模块)

驾驶人模块由方向模块和速度模块组成,其中方向模块用于计算转向盘角输入,速度模块用于计

算制动和油门变化量,二者都使用了“前视预瞄”跟随算法,其工作过程也都可以分成以下 2 个阶段。

(1)决策阶段.方向模块根据车辆尺寸特征和预设的通道利用系数 $\lambda_c$ 在行驶通道内决策出一条期望轨迹 $P_d$ ,如图 3a.其中 $\lambda_c \in [0, 1]$ ,表示通道宽度被使用的比例。当 $\lambda_c = 0$ 时, $P_d$ 只能位于通道中间;而当 $\lambda_c = 1$ 时, $P_d$ 可以靠近通道的任一侧,即驾驶人可以使用整个通道宽度。与此同时,速度模块根据道路几何特性、车辆性能和驾驶人耐受界限(侧向容许加速度 $a_{y\text{tol}}$ )计算出沿行驶方向变化的期望速度 $V_{\text{de}}$ ,如图 3b.其计算原则是弯道速度是由 $a_{y\text{tol}}$ 决定;弯道之间的速度变化是由减速度 $a_b$ 、加速度 $a_x$ 和环境速率 $V_{\text{max}}$ 控制。而 $a_{y\text{tol}}$ 、 $a_b$ 、 $a_x$ 和 $V_{\text{max}}$ 又都是随弯道半径、路面宽度和车道宽度变化的<sup>[6]</sup>。

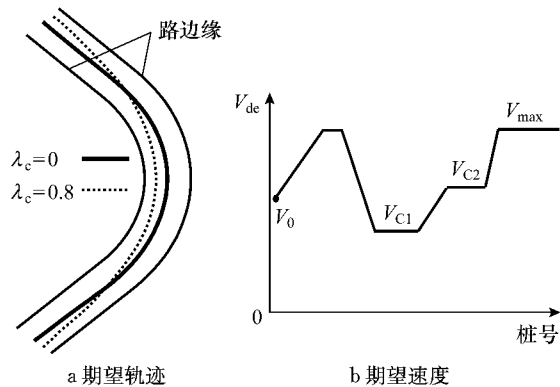


图3 期望轨迹和期望速度

Fig.3 Desired path and speed

(2)跟随阶段.方向和速度控制模块在此阶段的任务是对期望轨迹和期望速度进行跟随。其关键工作是计算出各时刻的横、纵向加速度偏差 $\Delta a_y$ 和 $\Delta a_x$ ,由 $\Delta a_y$ 和 $\Delta a_x$ 可以积分出转向盘转角、油门以及制动踏板的调整量,将其传递给车辆模型执行,经前视时间之后,即可使车辆轨迹和行驶速度分别落在期望轨迹和期望速度上。

## 2 弯道行驶试验设计

进行跟弯和切弯 2 种模式下的行驶试验,以得到弯道参数对切弯效用的影响规律。其中弯道参数包括半径、转角、路宽和曲线长度,切弯效用是用曲中速度增量大小 $\Delta V_c$ 和轨迹半径增量 $\Delta R$ 描述。

### 2.1 试验弯道的参数范围

表 1 是试验弯道几何参数的取值范围。其中半径 $R$ 是控制变量,另外 3 个参数即转角 $\Delta A$ 、路面宽度 $W_R$ 和回旋线长度 $L_S$ 的范围都是由 $R$ 决定。把半

径上界设为 300 m 的理由是:对于双车道公路,当  $R$  超过 300 m 时弯道速度已经和直道行驶速度接近,驾驶人进入弯道时已经无需减速,所以也就不会选择切弯行驶.由于切弯时驾驶人需要提前转向,每个弯道前、后分别有 200 和 300 m 的直线相连接.

表 1 试验弯道的几何参数

Tab.1 The geometry parameters of test curves

$R/m$	$\Delta A/(\circ)$	$L_s/m$	$W_R/m$	$W_S/m$
30	20~120	15~45	5~10	0.2~0.6
65	20~120	20~80	5~10	0.2~0.6
125	10~120	22~85	5~11	0.2~0.6
160	10~120	25~95	5~12	0.2~0.6
200	5~120	25~105	5~12	0.2~0.6
300	5~120	25~120	5~12	0.2~0.6

### 2.2 弯道上的方向控制和切弯的模拟

通过设  $\lambda_c = 0.9$  来模拟切弯行驶,即在 0.9 倍通道宽度内生成期望轨迹.由于是把车辆中点的运动轨线定义为轨迹,为了不使车身越出路面,应在路面宽度中扣除车宽  $B$ ,此外还应该预留出一个侧向安全距离  $W_s$ (见表 1),所以通道宽度应该为  $W_C = W_R - 2(B/2) - 2W_s = W_R - B - 2W_s$ .

为了计算切角效用,还需进行跟弯方式下的行驶模拟,此时以行车道中线为目标轨迹.设置了 0.4 m 的横向容许偏差来模拟驾驶人对车道中间位置的判断误差,在仿真过程中只有当车辆轨迹与期望轨迹之间的偏离超过该值时,才进行方向矫正<sup>[6]</sup>.

### 2.3 弯道上的速度控制参数设置

本文用侧向容许加速度  $a_{y\text{tol}}$  控制弯道部分的行驶速度,即  $V_{cc} = 3.6(R_{cc} \cdot a_{y\text{tol}})^{0.5}$ ,  $V_{cf} = 3.6 \cdot (R_{cf} \cdot a_{y\text{tol}})^{0.5}$ ,式中: $V_{cc}$ 和  $V_{cf}$ 分别为切弯和跟弯时的弯道通过速度; $R_{cc}$ 和  $R_{cf}$ 分别为切弯和跟弯时弯道轨迹半径.

将试验弯道的半径划分为 3 个范围,每个范围对应不同的  $a_{y\text{tol}}$ ,  $a_b$  和  $a_x$ ,如表 2.其中  $V_0$  是仿真初速度,  $V_{\text{max}}$  是路段最大速度.

## 3 切弯效用的量测指标

由于切弯的目的是提高通过速度并缩短行驶路径(体现为轨迹半径增加,弯道被拉直),所以用  $\Delta V_C$  和  $\Delta R$  来描述驾驶人切弯行驶时得到的效用.图 4 是车辆在一组 90 m 半径、35° 转角弯道上的行驶模拟结果,该图演示了  $\Delta V_C$  和  $\Delta R$  的提取方法,其中  $\Delta V_C$  是用切弯时的曲中速度  $V_{\text{ccm}}$  和跟弯时的曲中速

度  $V_{\text{cfm}}$  得到,  $\Delta R$  是用切弯时的峰值曲率  $\kappa_{\text{cp}}$  和跟弯时的峰值曲率  $\kappa_{\text{cq}}$  得到,  $\Delta V_C = V_{\text{ccm}} - V_{\text{cfm}}$ ,  $\Delta R = 1/\kappa_{\text{cp}} - 1/\kappa_{\text{cp}}$

表 2 切弯行驶模拟的速度控制参数

Tab.2 Speed control parameters while driver cutting curve

$R/m$	$a_{y\text{tol}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$V_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$V_{\text{max}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$a_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$a_b/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
30	2.05	60	80	0.65	2.20
65	2.05	60	80	0.65	2.20
125	1.80	70	90	0.60	2.00
160	1.80	70	90	0.60	2.00
200	1.80	70	90	0.60	2.00
300	1.55	70	95	0.55	1.78

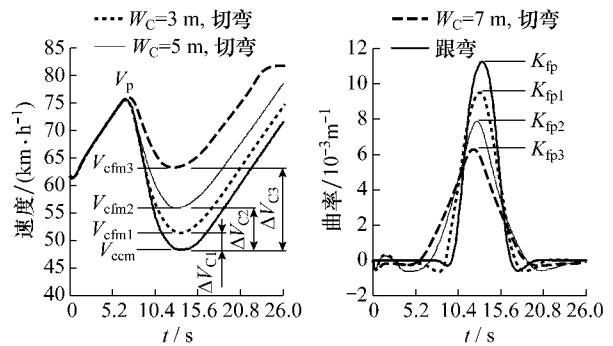


图 4 车辆在弯道上的通过速度和轨迹曲率

Fig.4 Driving speed trajectory curvature

## 4 试验结果分析

根据第 2 节的试验设计用“公路-驾驶人-车辆”仿真系统进行试验弯道的虚拟行驶试验,然后用第 3 节的方法得到了  $\Delta V_C$  和  $\Delta R$ .

### 4.1 曲线转角对切弯效用的影响

图 5 是车辆在一组弯道上的仿真轨迹,试验变量  $\Delta A$ ,图 5a~5f 中  $\Delta A$  分别为 20°, 35°, 50°, 70°, 90°, 120°,控制条件为  $R = 30 \text{ m}$ ,  $W_R = 5 \text{ m}$ .图中的三角网格是路面单元,从车辆尾部引出的曲线是车辆轨迹.从中能看到在曲线范围内车辆轨迹都是贴近弯道内侧的,即轨迹对弯道形成了“切弯”效果;并且  $\Delta A$  越大轨迹与路中线平行的部分越长,即轨迹与路中线越相似,反之,则二者的差异越大.

图 6 中横坐标上方的数值是车辆行驶至曲中位置时的轨迹半径,从中能知道,对于某个给定转角的弯道,切弯行驶能使轨迹半径放缓到什么程度.比较重要的结论有:

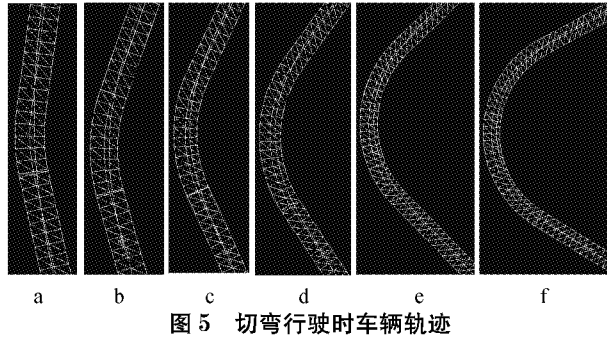


图5 切弯行驶时车辆轨迹

Fig.5 Vehicle track in curve areas while it cutting the curve

(1)  $\Delta A$  能够对轨迹半径产生明显影响, 体现为  $\Delta A$  越小曲中轨迹半径越大, 表明驾驶人在小转角弯道上操纵车辆比相同半径的大转角弯道容易。

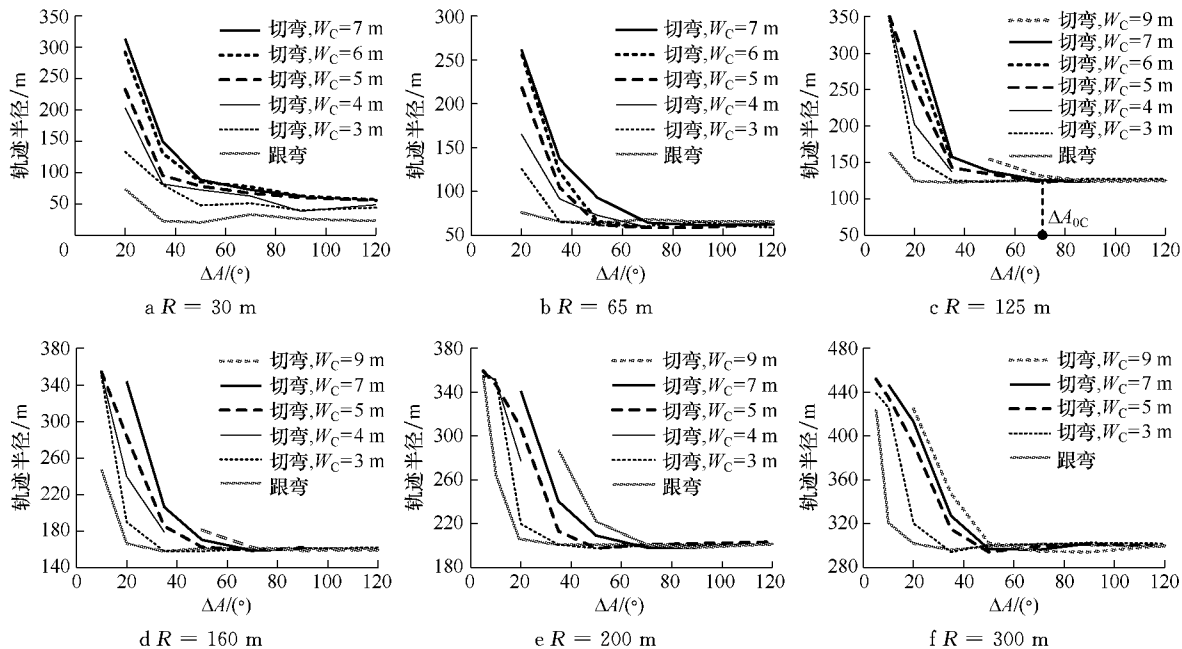


图6 弯道转角对曲中轨迹半径的影响

Fig.6 The effect of deflection angle on track curvature at the middle curve

图7中的试验结果反映了弯道转角对曲中速度增量的影响规律. 在以前的研究中, 尽管研究者已经认识到转角对行驶速度的影响<sup>[7-8]</sup>, 但其原因却一直让人费解, 这个问题在本文中可以得到很好的解释, 即  $\Delta A$  减小时, 切弯行驶时的轨迹半径将增大(轨迹变得缓和), 在侧向容许加速度近似维持不变的情况下弯道行驶速度必然提高. 从图7中还能得到的发现有:

(1) 对于大多数弯道, 当  $\Delta A = 20^\circ$  时驾驶员能够得到最大的速度增量; 对于少数半径较大的弯道, 最大切弯效用对应的转角可能提前至  $10^\circ$ . 超过这一转角后,  $\Delta A$  再增加速度增量则会减小, 当  $\Delta A$  超过零效用转角  $\Delta A_0$  时, 速度增量为零。

(2) 对于小转角弯道, 即使是跟弯行驶, 弯道中点的轨迹半径仍大于弯道设计半径. 并且, 随着  $R$  的增大, 轨迹半径增量变得非常显著, 表明小转角弯道对车辆轨迹和速度已经起不到控制作用。

(3) 零效用转角, 即  $R_{cc} = R_{cf}$  时的弯道转角  $\Delta A_0$ , 当通道宽度增加时  $\Delta A_0$  随之增大. 但对于  $R > 30$  m 的弯道, 存在一个特征转角  $\Delta A_{0c}$ , 当转角超过该值时, 曲线束集中于一点(见图6c), 此时增加通道宽度对舒缓轨迹曲率已经不起作用。

(4) 存在一个稳定转角  $\Delta A_{of}$ , 当  $\Delta A \geq \Delta A_{of}$  时, 跟弯行驶时的轨迹半径才开始稳定(近似等于设计半径). 换句话说, 只有当弯道转角超过该角度时线形才会对驾驶员的速度选择起到实际的限制作用。

(2)  $R = 30$  m 时, 在整个  $20^\circ \sim 120^\circ$  转角范围内选择切弯行驶都可以提高弯道通过速度。

(3)  $W_c = 3$  m 时, 除第1弯道之外, 其余5组弯道的  $\Delta V_c$  都是在  $\Delta A = 35^\circ$  时衰减为零, 表明  $35^\circ$  对窄路来说是一个关键的转角设计值。

由图6~7可以得到2个非常关键的转角值,  $\Delta A_{0c}$  和  $\Delta A_{of}$ , 如图8所示. 其中  $\Delta A_{0c}$  对应的是即使再增加路面宽度驾驶人仍无法获得切弯效用的临界转角;  $\Delta A_{of}$  对应跟弯行驶时对车速起实际控制作用的临界转角.  $\Delta A_{0c}$  对于交通管理非常有用, 当平曲线转角低于  $\Delta A_{0c}$  时, 驾驶人由于能够获得速度增量, 往往会选择切弯行驶, 此时如果想控制这种行为的发生, 则需在道路中线上设置阻隔设施. 而  $\Delta A_{of}$  对于

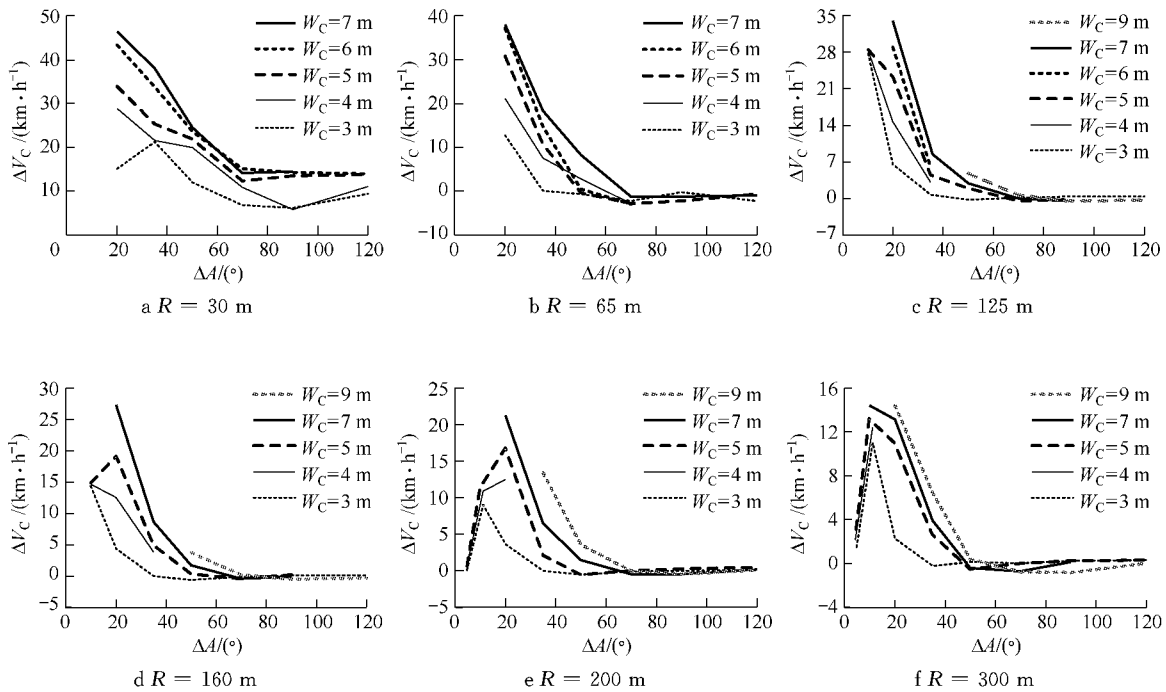


图 7 弯道转角对曲中速度增量的影响

Fig. 7 The effect of deflection angle on driving speed at the middle curve

公路平面线形设计则非常关键, 即当  $\Delta A > 20^\circ$  时, 弯道半径才会对车速起到真正的限制作用。

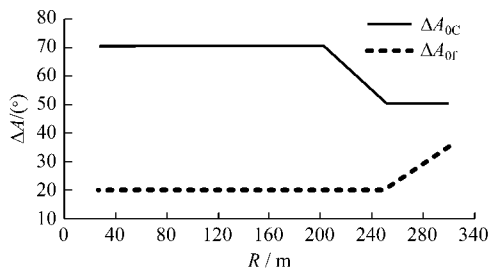


图 8 弯道的临界转角

Fig. 8 Critical deflection angle curves

#### 4.2 弯道半径对切弯效用的影响

图 9 给出了不同通道宽度、不同弯道转角情况下弯道设计半径对切弯效用  $\Delta V_C$  的影响, 从中能得到的结论有:

(1) 较大的速度增量总是发生在较低的半径上, 即小半径弯道所能带来的切弯效用更大. 除  $\Delta A = 5^\circ$  外, 其他各种转角的  $\Delta V_C$  曲线都是随  $R$  减小的, 因此可以认为切弯效用与  $R$  负相关。

(2) 对于  $10^\circ$  的小转角弯道, 切弯行驶总能够获得超过  $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度增量. 当然, 这是在侧向

容忍加速度  $a_{\text{yrol}}$  取通常水平的情况下,  $a_{\text{yrol}}$  提高时所获得的速度增量会更大。

(3) 对于  $20^\circ$  转角、30 m 半径的弯道, 切弯可以获得明显的速度增量, 当  $W_C = 3, 5$  和  $7 \text{ m}$  时, 速度增量分别为  $15, 34$  和  $46 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . 因此, 遇到此类弯道时, 驾驶人很难不去选择切弯行驶。

(4) 当弯道转角超过  $50^\circ$  时,  $\Delta V_C$  会随弯道设计半径的增加很快衰落。

#### 4.3 平曲线长度对切弯效用的影响

Spacek P 的研究表明弯道越长切弯行为发生的可能性越低, 但他并没有给出  $L_h$  的临界值<sup>[4]</sup>, 本文将试图做到这一点. 图 10 是 3 种通道宽度下  $\Delta V_C - L_h$  的散点图和外包络线, 从中可以作出如下判断:

(1)  $\Delta V_C$  与  $L_h$  负相关, 并且存在一个临界值  $L_{h0}$ , 当  $L_h > L_{h0}$  时,  $\Delta V_C = 0$ , 即不再产生切弯效用. 这时由于没有了提高弯道速度的动力, 驾驶人采用切弯行驶的可能性将大幅降低。

(2)  $L_{h0}$  同时还受通道宽度的影响. 当通道宽度  $W_C = 3 \text{ m}$  时,  $L_{h0}$  为  $150 \text{ m}$ ; 当  $W_C = 5 \text{ m}$  时,  $L_{h0}$  为  $200 \text{ m}$ ; 当  $W_C = 7 \text{ m}$  时,  $L_{h0}$  为  $250 \text{ m}$ .

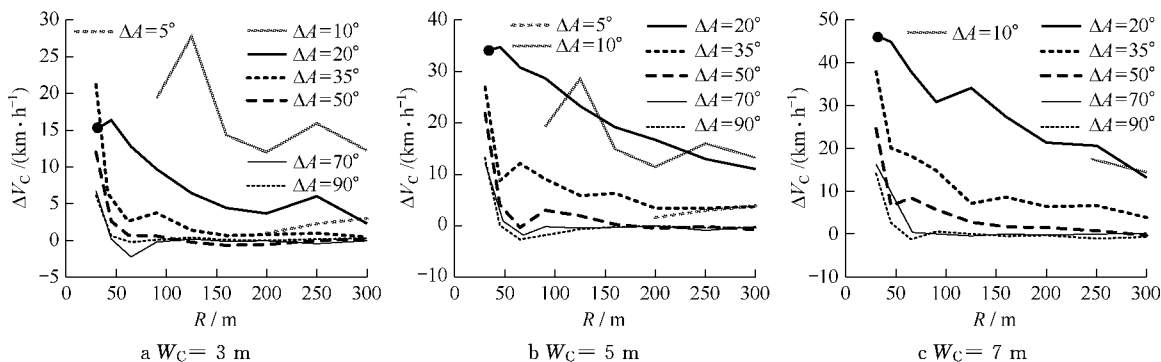


图9 弯道半径对曲中速度增量的影响

Fig.9 The effect of curve radii on speed increment at middle curve

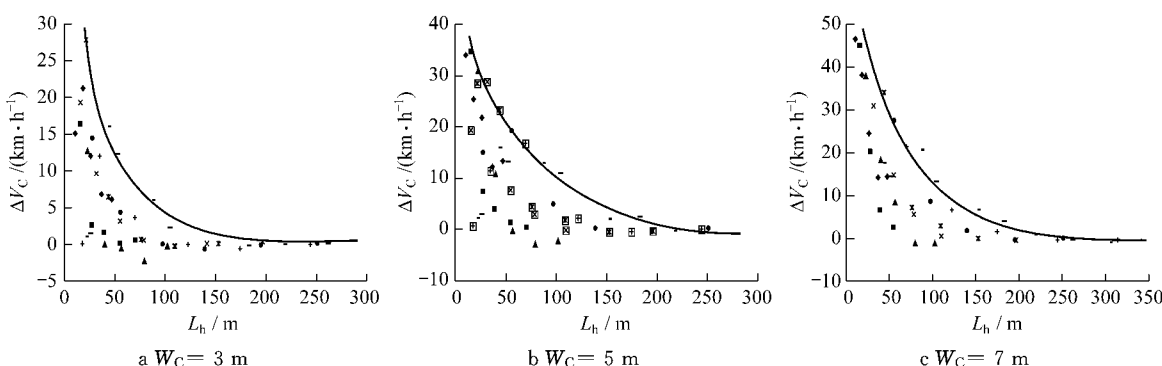


图10 曲中速度增量与平曲线长度之间的关系

Fig.10 The relationship between the length of horizontal curves and speed increment at middle curve

## 5 结语

切弯是公路上比例最大的一种行驶方式,所以非常有必要分析切弯时弯道范围内的车辆轨迹和速度特性及二者跟弯行驶时的差别.本文用“公路-驾驶人-车辆”行驶仿真系统模拟了切弯和跟弯2种驾驶方式下的弯道行驶过程,研究了切弯效用的2个量值——曲中速度增量 $\Delta V_c$ 和曲中轨迹半径增量 $\Delta R$ 与弯道几何参数之间的关系,从而得到了弯道半径、转角、通道宽度和平曲线长度对切弯效用的影响规律.此项研究有助于人们进一步了解公路上车辆运行过程和驾驶行为,对提高公路线形设计、交通管理和赛道设计的水平都有一定的意义.

### 参考文献:

[1] Tate F, Shane T. Road geometry and drivers' speed choice [J]. Road & Transport Research, 2007, 16(4): 53.  
 [2] Shinar D, Compton R. Aggressive driving: an observational study of driver, vehicle, and situational variables[J]. Accident Analysis & Prevention, 2004, 36(3): 429.  
 [3] 潘晓东, 隋永芹, 杨轸, 等. 山区公路小半径曲线事故黑点改

善效果评价[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(2): 220.

PAN Xiaodong, SUI Yongqin, YANG Zhen, et al. Effectiveness evaluation on traffic accident black spot in mountain highway with sharp radius of horizontal curve[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(2): 220.

[4] Spacek P. Track behavior in curve areas: attempt at typology [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(9): 669.

[5] 徐进. 道路几何设计对车辆行驶特性的影响机理研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输学院, 2009.

XU Jin. Effects of change in road geometry design on vehicle driving dynamics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. College of Traffic & Transportation. 2009.

[6] 徐进, 彭其渊, 邵毅明, 等. 山岭区低等级低指标公路路线的使用质量分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(2): 245.

XU Jin, PENG Qiyuan, SHAO Yiming, et al. Analysis of operating quality of low class highlands highway with minimum standard design elements[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 245.

[7] Lamm R, Choueiri E M, Hayward J C. Tangent as an independent design element [J]. Journal of Transportation Research Record, 1988 (1195): 123.

[8] McFadden J, Elefteriadou L. Formulation and validation of operating speed-based models using bootstrapping[J]. Journal of Transportation Research Record, 1997 (1579): 97.