

# 基于驾驶视觉需求的山区公路平曲线安全评价

潘晓东<sup>1</sup>, 方青<sup>1</sup>, 蒋宏<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市市政工程设计研究院, 上海 200092)

**摘要:** 利用 EMR-8B 眼动仪, 在平曲线半径连续变化的山区道路进行行车实验研究. 以视点分布指数、水平视角变化均离系数、驾驶员注视强度等指标对不同平曲线条件下驾驶员的视觉需求进行评价. 结果表明, 在小半径、小交角组合下路段行车时驾驶员接受到的道路信息量较大, 驾驶员的视点及水平视角不能很好地适应线形组合变化, 论证了小半径和小交角组合平面线形时平曲线半径应大于 125 m, 道路中心转角应大于 120°.

**关键词:** 平曲线; 视觉需求; 评价指标; 注视点

**中图分类号:** U 412.34

**文献标识码:** A

## Driving Visual Demand-based Safety Evaluation of Mountainous Highway Horizontal Curve

PAN Xiaodong<sup>1</sup>, FANG Qing<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design General Institute, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** By using EMR-8B, a lot of driving experiments were conducted in the mountain roads whose radius is continuously variable. The visual demand of drivers are evaluated by eye fixation distribution index (EFDI), average deviation of horizontal visual angle (AVEDEV), eye fixation intensity and other indexes of drivers' eye movements. The results indicate that the information that the drivers get from the highway with small horizontal curvature radius and intersection angle is more than that from other horizontal curves, and the level of the driver's viewpoint and horizontal visual angle are not well adapted to the requirements of alignment combination variety, and for the curve with small horizontal curvature radius and intersection angle, the radius should be more than 125 m, and the road center corner should be more than 120°.

**Key words:** horizontal curve; visual demand; evaluation index; eye fixation point

驾驶员在行车时需要足够的视觉信息并且控制汽车不断地调整行驶方向以适应道路线形的变化<sup>[1]</sup>. 道路线形的信息对驾驶行为的决策至关重要. 研究视觉需求和道路线形的相关性, 有利于更加准确地评价道路线形几何构造的安全性. 国内关于驾驶员视觉特性在道路交通安全领域的应用研究起步较晚, 而国外绝大多数以实验室仿真及驾驶模拟器来进行实验研究并获得数据, 但较少通过实车实验来获取数据<sup>[2-4]</sup>.

利用 EMR-8B 眼动仪系统, 通过大量的道路行车实验, 测定和分析驾驶员在行车时视觉需求同道路线形几何要素之间的相关性, 可对道路线形几何构造进行行车安全性评价.

## 1 实验设计与数据采集

### 1.1 实验道路与被试驾驶员

实验道路选取内蒙古 S203 线的一段越岭线为研究对象, 另外, 由于 S203 线实验段平曲线半径较大的路段较少, 为了使分析结果体现代表性, 借鉴了云南及浙江的山区高速公路补充实验的数据.

被试驾驶员选择了不同驾龄的男性 9 名, 矫正视力均在 5.0 以上. 其中对于内蒙古 S203 的道路线形行车实验选用了 3 名驾驶员, 对于云南及浙江的山区高速公路的行车实验, 选用了 6 名驾驶员.

### 1.2 实验车辆及仪器

实验车辆采用奥迪 A6(小型车)、金杯面包(中型车)、金龙中客(大型车)等车型. 实验仪器使用日本 NAC 公司 EMR-8B 眼动仪. 它由 EMR 主机、控制器、摄像机以及数据分析软件等部分组成.

### 1.3 实验设计

在实验路段, 用 EMR-8B 眼动仪把被试驾驶员

收稿日期: 2010-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878157); 湖南省交通科技进步与创新计划项目(200821)

作者简介: 潘晓东(1960—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为道路交通安全与环境工程、交通工效学及应用技术、道路交通规划与设计.

E-mail: panxd3@163.com

视野中的图像输入主机显示在场景监视器上,并用记录器予以录制保留,可以在被试者自然观察时记录其眼动资料.对于小半径平曲线处特征点位置(直缓点、直圆点、曲中等),对该位置进行标定,以便在处理数据时能够与线形对应.在内蒙古 S203 实验时的车速范围控制在  $30 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,部分直线路段略高,在云南及浙江的山区高速公路实验时的车速范围控制在  $60 \sim 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  之间.

## 2 驾驶员视觉需求评价指标

### 2.1 驾驶员视点分布指数

以左眼瞳孔中心为坐标原点,分别用眼球的旋转角度按上下各  $16^\circ$ ,左右各  $22^\circ$  长宽比例将视野分布区域划分成  $22^\circ \times 16^\circ$  的四个象限,如图 1 所示.

视点分布的分散程度,从侧面反映了驾驶员接受到视觉信息的繁杂程度.为反映视点分布的分散程度,定义视点分布指数(EFDI,以下用  $E_{\text{FD}}$  表示):

$$\text{视点分布指数} = \frac{\text{视点所占的单元的数目}}{22 \times 16} \times 100 \quad (1)$$

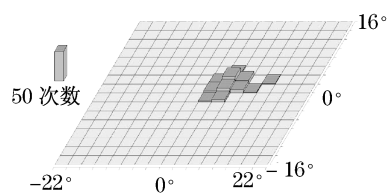


图 1 视野分布范围图

Fig. 1 Distribution range of vision

### 2.2 视点分布密度函数

视点分布密度函数可反映视点分布的分散程度.

通过假设检验对视点停留分布位置与频度分析发现:在一定的显著性水平和置信区间下,视点在视野的分布位置  $(X, Y)$  服从参数为  $\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho$  的二维正态分布,即  $(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho)$ . 其二维连续型随机变量  $(X, Y)$  的联合密度函数为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \left( \frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2\rho \frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \cdot \frac{y-\mu_2}{\sigma_2} + \left( \frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

### 2.3 驾驶员水平视角

驾驶员在行车时主要依靠眼睛来获取前方道路环境信息.假定行车过程中,汽车的行驶方向始终和道路横断面保持垂直,且驾驶员的头部保持不动,那

么汽车运动方向和驾驶员的视线就形成了一个夹角,将该夹角定义为水平视角<sup>[5]</sup>,如图 2 所示.

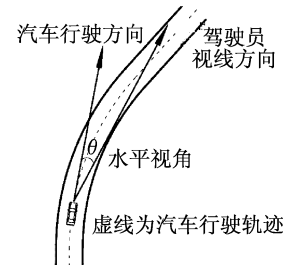


图 2 水平视角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal visual angle

水平视角变化的离散程度反映了驾驶员对行车环境的适应性.运用水平视角变化离散系数(AVEDEV,以下用  $A_{\text{VE}}$  表示)来表达水平视角数据变化的离散程度.其定义为驾驶员分别经过各平曲线时水平视角与其均值的绝对偏差的平均值.则有:

$$A_{\text{VE}} = \frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}| \quad (3)$$

### 2.4 驾驶员注视强度

当以一定的速度和距离行驶到曲线部时,道路信息量的强度会影响驾驶员的注视时间和次数;若每次视点的固定时间很长,视点固定次数反而减少;相反,若每次视点的固定时间很短,视点固定次数就相应地增加.将它们的关系定义为注视强度,也称为单一动视点指标.它表征了在一定的速度和道路信息量下,驾驶员处理信息的能力,可表示为<sup>[6-9]</sup>

$$a = T_a N_a \quad (4)$$

式中:  $a$  为驾驶员注视强度,量纲一;  $T_a$  为单一视点平均注视时间, s;  $N_a$  为单位时间内平均注视次数, 次  $\cdot \text{s}^{-1}$ .

## 3 视觉需求与道路线形的关系评价

### 3.1 视点分布指数与道路线形

通过实验数据采集和分析,可得出平曲线半径、道路中心转角  $\theta$  与视点分布指数(EFDI)的关系,如图 3~图 5 所示.

通过分析可得,驾驶员在自由车速下通过小半径和小交角组合的曲线部时,驾驶员的视点不能较好地适应线形变化的需求,因而导致视点的分布比较分散, EFDI 值较高. EFDI 值较高从侧面反映了在这类线形要素组合下的平曲线行车时,驾驶员接受到的来自道路线形方面的视觉信息量多而繁杂.

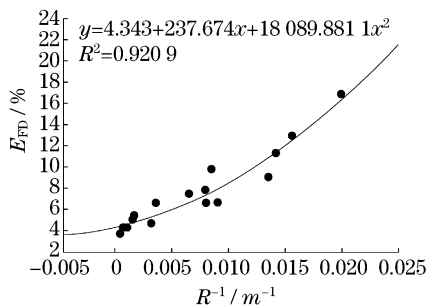


图 3 平曲线半径与视点分布指数的关系  
Fig.3 Relationship between horizontal curve radius and EFDI

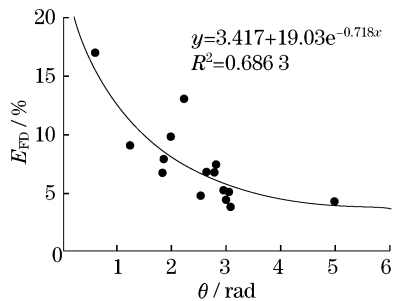


图 4 道路中心转角与视点分布指数的关系  
Fig.4 Relationship between road center corner and EFDI

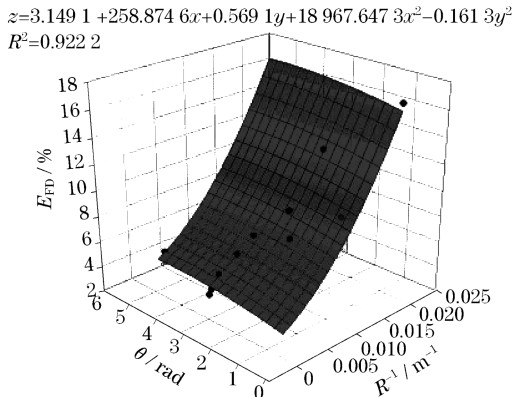


图 5 平曲线半径、道路中心转角与视点分布指数的的关系  
Fig.5 Relationship among horizontal curve radius, road center corner and EFDI

### 3.2 视点分布密度函数与道路线形

当速度一定时,不同平曲线半径条件下,可以得到视点分布密度函数.借助 Matlab 统计工具箱,可以得到视点二维正态分布的密度函数图像.例如,当  $v = 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,  $R = 64 \text{ m}$  和  $R = 890 \text{ m}$  线形条件下视点分布的密度函数图像如图 6,图 7 所示.其中,  $\alpha_x, \alpha_y$  分别为  $x, y$  方向的眼球旋转角度.

经过统计分析得出,在速度一定的情况下,曲率越大(半径越小)则视点空间分布区域就越大且分散,曲率越小(半径越大)则视点空间分布区域就越

小且集中.

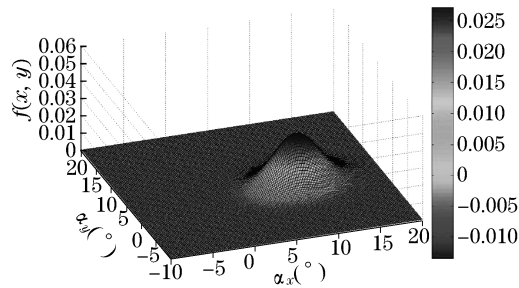


图 6  $R = 64 \text{ m}$  时视点分布概率密度函数  
Fig.6 Probability density function of eye fixation point distribution when the radius is 64 m

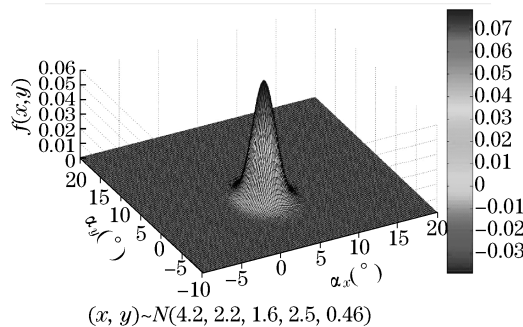


图 7  $R = 890 \text{ m}$  时视点分布概率密度函数  
Fig.7 Probability density function of eye fixation point distribution when the radius is 890 m

### 3.3 驾驶员水平视角特征与道路线形

将曲线半径和水平视角离均系数  $A_{VE}$  作线性回归,结果如图 8 所示.可以看出  $A_{VE}$  值随着曲率的变大(半径变小)而逐渐增大,这说明曲线半径越小,驾驶员水平视角振荡的幅度越大,驾驶员的视点越不能自然舒适地适应曲率变化.

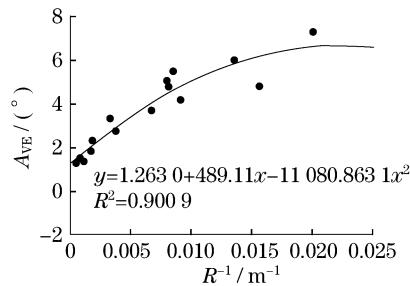
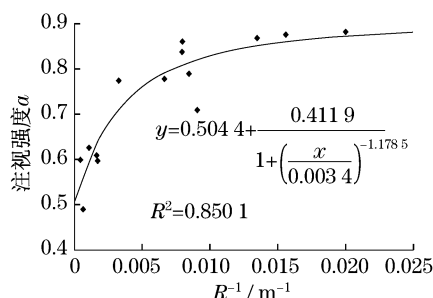
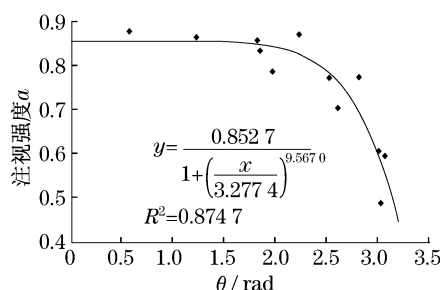


图 8 平曲线半径和水平视角  $A_{VE}$  关系  
Fig.8 Relationship between horizontal curve radius and  $A_{VE}$

### 3.4 驾驶注视强度与道路线形

将平曲线曲率及道路中心转角与相应的注视强度  $\alpha$  值进行回归分析,可得平曲线半径、道路中心转角与  $\alpha$  值的关系,如图 9 和图 10 所示.

图9 平曲线半径  $R$  与  $\alpha$  的关系Fig.9 Relationship between horizontal curve radius and  $\alpha$ 图10 道路中心转角  $\theta$  与  $\alpha$  的关系Fig.10 Relationship between road center corner and  $\alpha$ 

由图9可得,平曲线曲率与注视强度  $\alpha$  值呈正相关,由于曲率与半径是倒数关系,则平曲线半径与注视强度  $\alpha$  值应是呈负相关的.当平曲线半径大于125 m时, $\alpha$  值明显趋向于较低水平,而当平曲线半径小于125 m时, $\alpha$  值处于较高水平.由图10得,道路中心转角与  $\alpha$  值呈负相关,当道路中心转角大于2.1 rad( $120^\circ$ )时, $\alpha$  值明显趋向于较低水平,而当道路中心转角小于2.1 rad( $120^\circ$ )时, $\alpha$  值处于较高水平.

根据以上分析结果,从道路线形对驾驶员的视觉诱导效果出发,建议对于小半径与小交角组合平面线形,平曲线半径应大于125 m,道路中心转角应大于  $120^\circ$ .

## 4 结论

(1) 驾驶员在自由车速下通过小半径和小交角组合的曲线部时,由于驾驶员的视点不能较好地适应线形变化的需求,因而导致视点的分布比较分散,视点分布指数(EFDI)较高,这从侧面反映了在这类线形要素组合下的平曲线上行车时,驾驶员接受到的来自道路线形方面的视觉信息过载.

(2) 视点在空间的分布总体上呈现二维正态分布.视点的空间分布与曲率的相关性较大,曲率越大

(半径越小)则视点空间分布区域就越大且分散,曲率越小(半径越大)则视点空间分布区域就越小且集中.

(3) 曲线半径越小,驾驶员水平视角振荡的幅度越大,驾驶员的视点越不能自然舒适地适应曲率变化.

(4) 在小半径与小交角组合下行车时驾驶员接受到的道路信息量过大,依据回归曲线判明小半径与小交角组合平面线形时,半径应大于125 m,道路中心转角应大于  $120^\circ$ .

## 参考文献:

- [1] 王武宏,曹琦.道路交通系统中驾驶行为理论与方法[M].北京:科学出版社,2001.  
WANG Wuhong, CAO Qi. The theory and method of driving behavior in the road traffic system [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 蒋宏.基于驾驶员心率与视觉需求的山区公路线形安全评价研究[D].上海:同济大学交通运输工程学院,2007.  
JIANG Hong. The use of heart rate and visual demand to evaluate the safety of mountainous highway alignment [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [3] Shinar D, McDowell E D, Rockwell T H. Eye movement in curve negotiations[J]. Human Factors, 1977, 19: 63.
- [4] Kliegl R, Grabner E, Rolfs M. Length frequency predictability effects of words on eye movement in reading [J]. European Journal of Cognitive Psychology, 2001, 16(1): 262.
- [5] Victor T W, Harbluk J L, Engstrom J A. Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty [J]. Transportation Research Part F, 2005, 8(2): 167.
- [6] 潘晓东,杜志刚,杨轸.动视点指标及公路隧道进口平面线形评价研究[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(12):1662.  
PAN Xiaodong, DU Zhigang, YANG Zhen. Research between eye movement's index and horizontal alignment evaluation of highway tunnel's entrance [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12): 1662.
- [7] 杜志刚,潘晓东,杨轸,等.高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J].中国公路学报,2007,20(5):101.  
DU Zhigang, PAN Xiaodong, YANG Zhen, et al. Research of visual turbulence and driving safety during freeway tunnel's entrance and exit [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 101.
- [8] Hong I, Iwasaki M, Furuichi T, et al. Eye movement and driving behaviour in curved section passages of and urban motoway [J]. Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(10): 1319.
- [9] Fukuda R. Experimental considerations on the definition of eye fixation points [J]. Journal of Japan Ergonomics Society, 1996, 28(2): 197.