

道路几何设计对车辆行驶特性影响机理研究

于浩楠, 周 维

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 道路是由人、路、车辆等组成的综合体系, 车辆行驶受到道路几何参数的影响较大。首先分析了直线、圆曲线、坡长、坡度等参数对车辆行驶的影响。随后利用 Carsim 软件建立的车辆模型、道路模型及人一车一路的综合仿真模型, 并利用双移线法分析了模型的可靠度。最后依托某城市快速路, 利用车速变化系数 K_v 和侧滑安全系数 K_s 分析了车辆行驶特性变化规律。该研究成果可以为类似的城市道路几何设计提供一定的理论指导。

关键词: 道路线形; 几何参数; 车辆行驶; 影响机理

中图分类号: U41.U491

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)09-0160-04

0 引 言

随着基础设施网络不断完善, 道路工程建设规模不断扩张, 车辆安全事故数量也逐年增加。由于车辆行驶期间影响因素多, 责任难以划分, 相关部门在进行交通事故统计时往往将驾驶员行为作为诱发事故的主要因素。但是, 道路交通是由人、路、车辆等组成的综合体系, 车辆行驶往往会受到道路几何参数的干扰更大。合理设计道路几何线形, 提高车辆行驶安全性已经成为需要解决的重要问题。

近年来, 国内外学者及工程师也通过现场调研、室内仿真实验等方法来探讨道路线形设计对车辆行驶的影响, 并提出一些有价值的研究成果: 孙悦^[1]构建了道路几何参数优化模型, 得到了不同行车速度下车辆的停车视距建议值; 符锌砂等^[2]基于空间曲率和挠率建立了公路三维线形模型, 并分析了各线形要素对车辆行驶安全性的影响规律。谢瑶^[3]以某城市主干路为研究对象, 研究了道路平面线形、纵断面线形、横断面对车辆行驶平顺性的影响。但是, 相关理论并不完善, 设计人员在开展道路几何设计时, 主要以工程类比法为主, 对车辆行驶特性考虑不全面。因此, 研究道路几何设计对车辆行驶特性影响具有十分重要的工程意义。

1 道路线形对车辆行驶的影响

1.1 平面线形

道路是一种三维带状空间结构, 其线形设计要

素主要包括平面线形和纵断面线形, 应分别考虑各线形要素对行车安全的影响。

1.1.1 直线

直线是道路平面线形设计中最常用线形之一。车辆在直线上驾驶具有受力简单、速度快、距离短等特点。一般情况下, 直线越长, 交通事故越容易发生, 且事故损失越严重。直线过长对车辆行驶的影响主要体现在视觉反应、心理承受能力等。一方面, 直线较长的线形较为单调, 视觉参考少, 驾驶员容易注意力分散, 难以目测车辆间距, 遇到突发事件, 难以做出正确反应; 另一方面, 驾驶员在长直线上行驶会不自觉地加大车辆行驶速度, 长距离的高速行驶会使驾驶员感到疲乏, 从而导致严重的交通事故。

1.1.2 圆曲线

道路在需要改变方向的路段, 为了与地形适应, 保持线形的连续性和美观性, 往往以设计圆曲线来过渡。圆曲线对道路交通安全的影响要大于直线段, 且圆曲线起点和终点最容易诱发交通事故。主要原因在于: 车辆进入或驶出圆曲线(尤其是小半径曲线), 速度会大幅降低或增加, 导致较大的速度差。车辆速度差越大, 在遇到突发事件时, 驾驶操作越容易出错, 事故率也越高。杨挺^[4]统计了车辆行驶期间的交通事故率随圆曲线曲率的变化规律, 如表1所列。

表1 道路圆曲线曲率与车辆事故率关系一览表

圆曲线曲率	事故率	备注
0~1.9	1.62	次/百万车公里
2~3.9	1.86	
4~5.9	2.17	
6~9.9	2.54	
10~14.9	8.45	
≥15	9.26	

收稿日期: 2021-01-08

作者简介: 于浩楠(1988—), 男, 工学硕士, 工程师, 从事路桥工程设计工作。

由表 1 可知:道路安全事故率会随着圆曲线曲率增加而提高,且增长速率逐渐加快。当圆曲线曲率从 0 增加到 10,道路安全事故率提高了 55.8%;当圆曲线曲率从 10 增加到 15,道路安全事故率提高了 263.4%。这是因为道路圆曲线曲率增加,车辆在行驶期间的转弯半径会减小,则车辆所受横向力提高。当横向力大于轮胎与地面的摩阻力时,车辆会出现侧滑事故。此外,圆曲线曲率增加,视线盲区范围会不断扩大,增加了安全隐患。

1.2 纵断面线形

1.2.1 最大坡度

道路纵坡越大,交通事故发生率越高。当路线纵坡超过 4%时,在车辆自身重力及惯性力共同作用下,车辆加速度较大,车速持续增加,而行车事故大多发生在速度较高处。同时,路线最大纵坡与车辆爬坡能力等密切相关。车辆爬坡能力不同,纵坡对其行驶速度的影响有一定的差异,会导致不同车辆在爬坡期间存在较大速度差,从而引起超车或追尾事故。

为了提高道路车辆行驶的安全性,应当对各路段的最大坡度进行限制。如果某路段存在多个坡度值,可选择平均坡度法对其坡度进行验算,如下式^[5]:

$$i_{均} = \frac{\sum l_i \times i}{\sum l_i}$$

式中: $i_{均}$ 为平均纵坡,%; l_i 为坡度*i*对应的坡长,m。

1.2.2 最大坡长

上坡路段:上坡坡长过大,车辆行驶期间的换挡频率高,不仅会增加驾驶人心理负担,还会引起发动机发热,水箱温度上升,油耗增加,导致汽车熄火后溜(轮胎与路面摩擦力不足)。同时,上坡坡长较大会导致驾驶人对坡度误判,从而采取错误的行驶操作。

下坡路段:下坡坡长过大,车速会快速增加,车辆行驶期间需持续踩制动器。但是车辆频繁制动后刹车片会严重磨损,导致制动失效,引发交通安全事故。

同时,道路纵坡不宜过短,否则变坡点数量多,车辆行驶期间的平顺性较差。确保行车安全的最小坡长一般按 9 s 行程计算,且满足表 2 规定:

表 2 不同设计速度下的最短纵坡长度						
设计速度/(km·h ⁻¹)	30	40	60	80	100	120
最短坡长/m	100	120	150	200	250	300

2 人-车-路综合仿真模型可靠性评价

为了更深入地分析道路线形参数对车辆行驶特

性的影响机理,拟采用 Carsim 软件建立车辆仿真模型来评价车辆行驶速度安全性和侧滑安全性。

2.1 Carsim 软件仿真原理

Carsim 是基于 VehicleSim 技术研发的一款车辆动力学仿真软件,包括车体悬架、轮胎模型、道路条件模型、空气动力学模型等,具有操作简单,可移植性强等特点。Carsim 软件的仿真模拟分为模型建立、参数输入、仿真求解、数据输出等步骤,其中仿真求解是核心。Carsim 软件的仿真求解是采用二阶龙格-库塔法建立数学模型,该方法精度高,且不用判断仿真步长是否满足要求,在很大程度上提高了模型运算的实时性和效率^[6]。

二阶龙格-库塔法计算式如下:

$$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$
$$\begin{cases} y_{t+\Delta} = f(t) + \Delta ym' \\ y(x_0) = f(t+h/2, ym) \end{cases}$$

式中: t 为仿真时间; Δ 为仿真步长; ym' 为半仿真步长点的导数值。

2.2 仿真模型建立

2.2.1 车辆模型

通常情况下,车辆主要由车体、动力系统、制动系、传动系、转向系、悬架和轮胎等组成。为了提高仿真试验精确度,Carsim 软件可对车辆不同部件进行参数化处理,将车辆模型简化为 10 个刚体,27 个自由度,其中刚体包括 1 个车体部分、4 个旋转车轮、1 个发动机曲轴部分、4 个余下质量部分。

2.2.2 道路模型

Carsim 软件是利用道路中线的三维坐标来定义出道路走向及平纵线形组合。在道路模型中,沿参考线路径长度 S 是相对独立的空间变量。如果道路中线长度取值不变, S 也是固定值,会存在唯一对应坐标 (x, y) 。此时,可通过“插值法”来确定路线几何参数,再分段输入各路段的属性。具体建模过程如下:定义道路中线平面位置和高程→定义横断面宽度和超高→输入道路摩擦系数(模拟路面结构)→道路环境设置。

2.2.3 人-车-路综合模型

为了准确模拟车辆在道路上的行驶特性,建立了人-车-路的综合仿真模型,如图 1 所示。

在仿真模型中,驾驶员是根据车辆尺寸、车辆性能、道路条件等因素及时作出动态相应,并通过最优预瞄控制理论控制车辆安全行驶。随后,仿真模型可

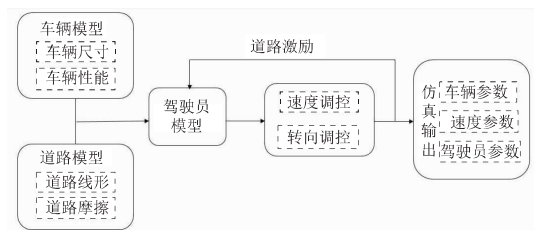


图 1 人一车一路的综合仿真模型

通过监测车辆行驶状态来输出相应的车辆参数、速度参数和驾驶员参数^[7]。

综上,在人一车一路交通系统内,驾驶员、道路线形、车辆之间是相互协调,共同作用的。即道路线形会影响驾驶人在驾驶车辆时的安全性,车辆行驶状态也能直接反映道路线形组合的优劣。

2.3 仿真模型可靠度分析

在进行车辆仿真试验之前,必须对仿真模型的稳定性和可靠度进行评价。双移线仿真试验可以测试车辆模型在超车期间行车轨迹变化及驾驶员对车身的控制能力,故用来评价仿真模型可靠度是可行的。

双移线仿真试验的初始期望速度选择 80 km/h, 得到的车辆路径偏移轨迹见图 2 所示。

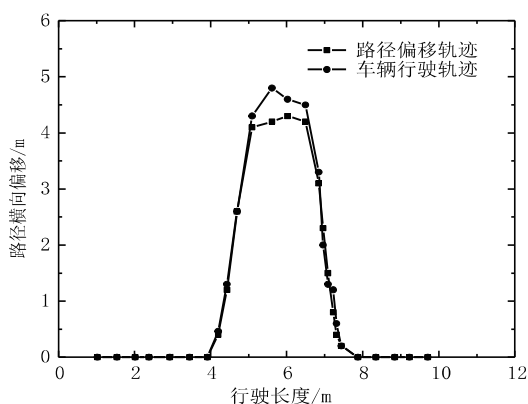


图 2 车辆行驶路径分布图

试验结果表明, 车辆行驶轨迹和路径偏移轨迹误差在允许范围内, 这表明人-车-路综合模型的可靠度满足要求。

3 车辆行驶安全的安全性评价

3.1 工程实例

依托项目是某城市快速路,路线全长 25.84 km,起讫桩号 K2+680~K28+620。该道路建设标准为双向四车道,设计时速 80 km/h,路基宽度为 24 m,最大纵坡为 7.4%。选择道路弯、坡组合较复杂的 K10+450~K12+710 路段为载体,来评价车辆行驶安全性。

在 Carsim 软件中输入该路段的逐桩坐标和沿线

高程来搭建三维道路模型。车辆行驶试验中将驾驶员反应延迟时间为 0.05 s, 预瞄距离为 200 m, 预瞄间隔 2 m, 预瞄时间设置为 1.5 s。

3.2 评价指标选择

3.2.1 车速变化系数

传统的车辆行驶速度安全性评价往往采用相邻路段平均运行速度差 ΔV_{85} 。笔者结合多个项目经验,认为车速变化系数 K_v 更能反映道路几何参数对车辆行驶安全性的影响。在计算车速变化系数之前,应当根据道路平面、纵断面指标等将其划分成若干路段,逐段计算 K_v ,并参考表 3 对车辆行驶安全性进行评价。车速变化系数计算公式如下^[8]:

$$K_v = \left| \frac{V_{85n+1} - V_{85n}}{20} \right|$$

式中: V_{85n+1} 、 V_{85n} 为第 $n+1$ 路段和第 n 路段的第 85 分位行驶速度。

表 3 车辆行驶安全等级评价一览表

车速变化系数	≤ 0.5	$0.5 \sim 1$	> 1
安全等级	优	良	差

3.2.2 侧滑安全系数

车辆在转弯、超车时,如果轮胎与地面附着力不能抵消车辆向心加速度,车辆就会出现侧滑现象。同时,《汽车操纵稳定性试验方法》(GB T6323—2014)规定:普通车辆侧向加速度 $a_y < 0.4 \text{ g}$ 。因此,可假设侧滑安全系数 K_S (侧向加速度与 0.4 g 的比值)来评定车辆行驶侧滑安全性。

3.3 车辆行驶特性评价结果

3.3.1 车辆速度安全性分析

将研究区域按每段 200 m 进行划分, 各相邻路段的车速变化系数 K , 模拟结果见图 3 所示。

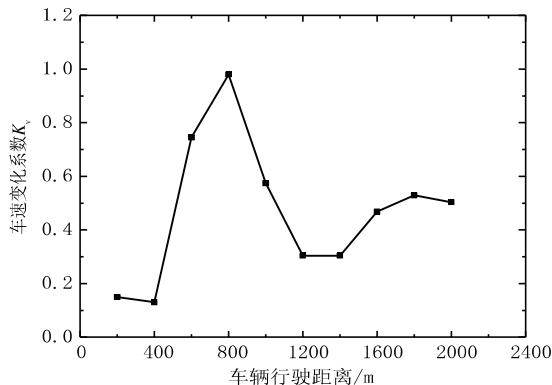


图 3 相邻路段车速变化系数曲线图

图3表明:车速变化系数 K_v 取值均小于1,且随着道路线形走向持续变化,能满足车辆安全行驶的速度要求。此外,在K11+350~K11+650路段,受道路曲率与行车速度的影响, K_v 偏大,可在路段前增设

减速带、减速牌等来提示驾驶员控制车速。

3.3.2 车辆侧滑危险性分析

道路沿线的侧滑安全系数 K_s 模拟结果如图 4 所示。

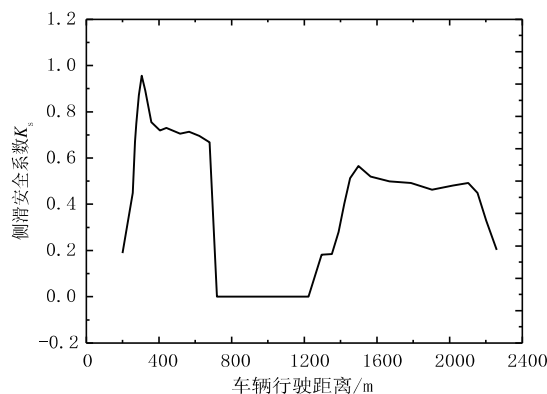


图 4 各路段侧滑安全系数曲线图

图 4 表明:车辆以时速 80 km/h 行驶时,沿线的侧滑安全系数均小于 1,基本不会发生侧滑现象。但是,在 K10+850 路段附近,车速以快速驶入弯道,车辆侧倾力增加,侧滑安全系数迅速变大($K_s \approx 1$),此时车辆处于侧滑的临界状态,驾驶员应及时控制车速,确保行车安全。

4 结 语

经探讨道路平面线形和纵断面现线形的影响,并利用车辆仿真实验,评价车辆行驶的安全性,主要得出以下结论:

(1)道路直线和圆曲线对车辆行驶的影响主要

体现在驾驶员视觉反应、心理承受能力、行车速度等方面,圆曲线对道路交通安全的影响要大于直线段。

(2)道路的纵坡坡度和坡长应满足规范要求,否则会干扰车辆爬坡能力、制动效果、行驶平顺性等。

(3)人—车—路综合仿真模型可靠度满足要求,能反映道路线形与车辆之间的相互作用。

(4)车速变化系数和侧滑安全系数会随着道路线形不断变化。当 K_v 和 K_s 取值接近 1,车辆行驶安全性处于临界状态,驾驶员应加强车辆速度控制。

参考文献:

- [1] 孙悦. 海绵型道路关键几何设计参数优化及雨天行车安全研究[D]. 广州:东南大学,2019.
- [2] 符铎砂,葛婷,李海峰,龙立敦,王晓飞.基于公路三维线形几何特性的行车安全分析[J].中国公路学报,2015,28(9):24-29.
- [3] 谢瑶. 道路几何设计对行车舒适性的影响与改善方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [4] 杨挺. 道路线形因素对交通安全的影响分析[D].西安:长安大学,2017.
- [5] 徐进,邵毅明,杨奎,罗晓,罗庆.基于人—车—路协同仿真的山区道路大型车辆行驶适应性分析[J].中国公路学报,2015,28(2):14-25.
- [6] 王慧丽,史忠科.基于 GPS/IMU 的山区道路参数拟合与行车安全分析[J].中国公路学报,2014,27(6):27-33.
- [7] 白钢. 基于车辆行驶稳定性仿真的道路几何线形设计参数研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [8] 王栋梁.道路几何线形与速度的相关性分析[J].交通世界(运输.车辆),2008(8):124-125.

(上接第 156 页)

(3)应在成型隧道管片上做好拉结和配重,确保成型隧道的质量。

(4)应调整千斤顶的推力,确保管片均匀受压。

(5)应调整盾构姿态、控制盾尾间隙,减少盾构蛇形超挖。

参考文献:

- [1] 沈冬强. 地铁盾构全断面淤泥质粉质黏土层掘进施工的技术研究[J].城市道桥与防洪,2020,254(6):175-177.
- [2] 王旋东. 砂性土层盾构隧道管片上浮因素分析及控制技术[J].上海建设科技,2020(2):36-38.
- [3] GB 50446—2017,盾构法隧道施工及验收规范[S].