

【其他研究】

基于人-车-路虚拟试验的道路线形安全性评价

任秀欢¹,何杰²

(1. 南京莱斯信息技术股份有限公司, 南京 210007; 2. 东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘要: 为了避免由线形设计不良造成日后事故多发路段的发生, 提出了基于人-车-路虚拟试验的道路线形设计安全性评价方法。首先基于对公路线形导致交通事故的分析, 选取并构造了轨道跟踪误差、转向任务间隔、方向盘峰值转速、侧向加速度、垂直荷载和路段通行极限车速为道路线形安全性评价指标; 采用 EICAD 和多体动力学软件 ADAMS/Car 实现了道路设计方案的三维建模, 然后与车辆模型、驾驶员模型构成仿真环境完成了对安徽至浙江某高速公路线形设计方案的安全性评价; 多数评价指标显示该设计路线安全性较好, 但路段通行极限车速显示该路段前段(里程 0~2.47 km)行车速度分布较分散, 容易诱发超速行驶, 为潜在的事故多发路段。

关键词: 道路线形设计; 安全性评价; ADAMS/Car; 虚拟试验; 事故多发路段

中图分类号: U461.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2011)03-0120-04

道路线形设计的是否合理是导致公路交通事故的一个主要原因, 在某些路段交通事故明显集中, 而在道路几何特征良好的路段上相对较少, 就充分说明了这一点。因此, 对道路线形设计方案进行安全性分析具有重要意义。为此, 需要建立能够明确的、全面的表示公路线形安全性的评价指标, 并能够有效实施评价及设计控制。

然而, 道路线形设计本身不体现安全性, 它需要通过与驾驶员-车辆系统的相互作用才得以体现, 如驾驶员驾车过程实际为路线跟踪过程, 驾驶员采取什么样的操作行为, 主要靠他对来自道路环境信息的反馈; 而在道路安全研究中往往也是通过路段上统计发生的交通事故数来鉴定事故多发路段^[1-2]。因此, 道路线形设计的安全性分析应建立在人-车-路相互作用的基础之上, 评价指标应反映道路交通事故。

在研究现有的道路线形安全性评价方法的基础上, 构建了基于道路交通事故的评价指标, 采用 ADAMS 软件建立了人-车-路仿真环境并进行了道路线形安全性评价试验, 通过综合分析评价指标对应的输出结果以揭示路段的安全性以及可能发生的交通事故类型。

1 道路线形导致事故分析及安全性评价

1.1 基于线形的道路交通事故分析

道路线形设计包括线形组合和线形尺寸设计, 线形组合应自然流畅, 避免单调, 否则将导致汽车无法跟踪行驶或因长时间单调驾驶发生交通事故; 线形尺寸设计中平曲线曲率过大可能使得汽车跟踪转向不足, 在离心力的作用下发生侧滑, 竖曲线导致汽车轴载明显变化, 影响汽车制动性甚至发生纵向翻车, 超高不当可能使得汽车侧翻; 路段组成部分的尺寸改变不应过大, 否则将引起驾驶员精神过分紧张和情绪

上的不稳定, 造成交通事故^[3]。

1.2 道路线形安全性评价方法

目前, 国内外主要采用相邻路段运行速度的差值(ΔV_{85})来进行公路线形设计安全性评价, 此方法的不足是忽略了导致交通事故的主要隐患——15% 的高速或超速行驶车辆^[4]; 文献[4]中为了解决此问题, 提出了基于可能速度的线形安全性评价, 但理论求解的速差量不能反映实际车-路复杂的动态作用, 评价指标不能揭示线形尺寸设计的不安全性。

基于经典力学的分析, 文献[5]中推导出考虑平、纵、横 3 方面关系的横向加速度变化率表达式及评价方程和控制方程, 式中含有曲线超高、曲率、汽车加速度(或纵坡)、汽车行驶车速等变量。此方法存在 2 点不足: ① 必须先进行汽车行驶速度的推导, 且汽车行驶速度随曲线变化而变化, 否则与推导过程中考虑汽车途径纵坡的加减速情况相矛盾, 评价过程实施困难, 实际意义不大; ② 影响安全的因素是多方面的, 仅以横向加速度变化率的大小来指导设计是不全面的。

此外, 部分文献构造的评价指标却能恰当的反映道路安全性^[6-8]。文献[7]中构造了反映线形组合在操纵上的不安全特征的 2 个指标: 峰值转速 $\delta_{ap,i}$ 和转向任务间隔 $t_{90,i}$; 文献[8]中从研究车辆闭环控制性能的角度提出了轨道跟踪总方差、转向盘角速度总方差、侧向加速度总方差及前、后轮侧向力系数总方差指标。

1.3 线形安全性评价指标的选取与构造

基于 1.1 中的分析, 选取了轨道跟踪误差、转向任务间隔、方向盘峰值转速和侧向加速度指标, 并构造了用以反映翻车危险性的垂直荷载指标, 表 1 为各指标意义及门限值, 门限值参考文献[7-8]。其中, 转向任务间隔通过方向盘转角响应输出来分析, 转角呈某一固定值的时间段为转向任务间隔。

收稿日期: 2010-12-21

作者简介: 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708020)、“东南大学优秀青年教师资助计划”资助项目(2008)。

作者简介: 任秀欢(1984—), 女, 硕士, 主要从事道路行车安全研究。

表1 公路线形安全性评价指标

指标	门限值	意义	
轨道跟踪误差	0.3 m	表示跟踪精确性,总体上反应线形设计是否有利于安全行车	
转向任务间隔	50 s	衡量转向任务的均衡性,检查线形组合是否合理	
方向盘峰值转速	1.0 rad/s	描述驾驶者的操纵紧张程度,反映公路线形操纵负荷	
侧向加速度	0.3 g	关系到是否容易侧滑,保证行车安全的重要指标	
垂直荷载	左、右侧轮荷载	—	关系到是否容易发生侧翻,保证行车安全的重要指标
	前、后轮荷载	—	关系到是否容易发生纵向翻车,保证行车安全的重要指标
路段通行极限车速	—	能够反映线形指标是否满足设计车速及车速分布情况	

1.4 垂直荷载指标

车辆在行驶过程中,重心位置会随着道路的变化而发生移动,重心在横向上的移动将导致左、右侧车轮垂直荷载有所变化,当两侧荷载之差超过某一最大值 $F_{y,max}$ 时,或者一侧车轮垂直荷载接近0时,车辆发生侧翻事故;同理,汽车重心在纵向上的移动有可能导致车辆发生纵翻事故。可见,垂直荷载的变化可以反映车辆发生翻车事故的可能性。不同车型的前后轮荷载之差的最大值 $F_{x,max}$ 、 $F_{y,max}$ 不同,需要实验加以鉴定,本文中只做定性分析。

2 人-车-路仿真实验设计

人-车-路仿真系统包括道路模块、车辆模型库以及驾驶员控制模块。其中,道路模型数据来自道路设计方案,能够真实反映出道路平、纵、横3方面几何要素,使得仿真试验能够用于对道路设计方案进行评价,具有现实意义;车辆模型库包括小客车、大客车、大货车3种标准结构的整车模型,用ADAMS/Car事先建立好车辆模型,待仿真时直接调入即可;驾驶员对方向和速度的控制均采用“前视预瞄”的跟随策略,在仿真开始时先决策出期望速度和期望轨迹,然后提供给车辆跟随。图1为车辆模型在空间道路上自动行驶的仿真场景。

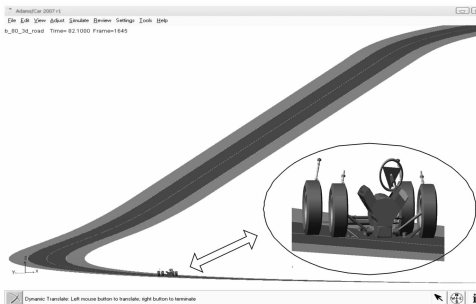


图1 仿真试验场景

2.1 道路模型

2.1.1 试验路段

试验路段为安徽至浙江某高速公路的设计方案,设计车速 $V_d = 80 \text{ km/h}$,4车道,路段总长4 km。路段平面线形由4个直线段和4个曲线段构成,平曲线半径 $R \in$

$[0.5 \text{ km}, 1.4 \text{ km}]$,平均半径 $\bar{R} = 0.649 \text{ km}$,曲线在线形中的比例 $P_c = 59.5\%$;路段纵坡度 $i \in [-3.7\%, 1.5\%]$,纵断面含有4个曲线段,竖曲线半径 $R \in [5 \text{ km}, 25 \text{ km}]$,平均半径 $\bar{R} = 14.9 \text{ km}$;道路设计方案中采用沥青路面,路面附着系数 $f_s = 0.6$,图2为路段的平面模型及设计要素,图中 R 为曲线半径, L_s 为回旋线长度, B 为超高值, P 为坡差。

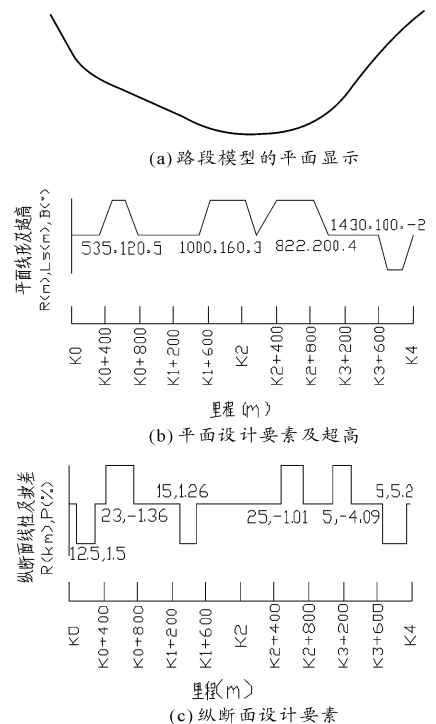


图2 试验路段的平面模型及相关设计要素

2.1.2 建模方法

道路线形方案在CAD中设计,完整的道路线形是平、纵、横3方面设计指标综合而成的空间曲线,为了在ADAMS中建模方便,需要把路段起点设为原点。当线形方案确定后,通过道路设计专业软件EICAD输出设计指标值。首先需要对路段标定桩号,设计指标输出值是每个桩号处的设计值,试验路段设置桩号间距为1 m。输出内容为逐桩坐标,直(曲)线及转角、竖曲线要素及曲线位置,表2为试验路段逐桩坐标的部分内容。

表2 逐桩坐标表

桩号	坐 标		
	X	Y	Z
...
MK0 + 321	321.000	0.005	1.383
MK0 + 322	322.000	0.007	1.398
MK0 + 323	323.000	0.008	1.413
MK0 + 324	324.000	0.010	1.428
MK0 + 325	325.000	0.012	1.443
MK0 + 326	326.000	0.014	1.458
...

ADAMS 中通过定义 3D 道路属性文件(.rdf)来建立三维平滑路面模型,定义变量有道路各个标记点处的空间坐标、标记点处道路宽度、道路横截面坡度角、道路左、右侧摩擦系数。各个标记点顺序连接成道路的中线,为车辆跟踪的预期轨迹。

定义路段桩号为标记点,建立试验路段在 ADAMS 中的路面模型;为了便于研究,道路宽度设置为单车道幅宽,为 3.75 m;道路横截面坡度角为平曲线段的超高,按照直(曲)线及转角输出值设置圆曲线超高,两端缓和曲线超高设置为等差变坡度角,使得圆曲线(超高为某一定值)与直线段(超高为 0)平缓过渡;设置道路左、右侧摩擦系数均为 0.6,建立道路模型如图 1 所示。此方法能够保证仿真试验中的道路模型与道路线形设计的高度一致性。

2.2 仿真车型

通过对南京机场高速某段车流量调查统计,小客车占车型构成 70% 以上且具有高速行驶的特征,对于道路线形安全性具有较高的要求。因此,本文中以小客车为例研究其在试验路段上的行驶特性,选取的车型是 JETTA GTX 轿车。采用 ADAMS/Car 建立的 JETTA GTX 轿车模型由麦弗逊独立前悬架、纵臂扭转梁式独立后悬架、刚性底盘、发动机子系统、盘式制动系、齿轮齿条式转向助力子系统及子午线轮胎子系统构成^[9-10],表 3 为部分整车参数。

表3 整车参数

名称	内容
车长 L	4 385 mm
轴距	2 472 mm
转向机构总传动比	20.8
轮胎径向刚度	190 N/mm
轮胎侧偏刚度	60 000 N/rad
质心坐标	950, -2,680(mm)
整车整备质量 M	1 095 kg
空载时前轮垂直荷载	6 625 N
空载时后轮垂直荷载	4 106 N

2.3 仿真实验设置

在 ADAMS/Car 中,采用路线追踪试验研究车辆在设计车速下行驶的动态响应,采用智能驾驶试验研究设计道路的极限通过车速。智能驾驶试验中解算器首先根据轮胎、发动机、制动特性计算通过某个路径断面可能的一组速度的最大极限值,然后使用驱动器控制汽车的发动机油门、制动、转向完成全部仿真^[10],试验步长均为 0.01 s。

3 道路设计方案安全性分析

图 3 至图 6 是 JETTA 轿车在设计车速下沿道路行驶的动态响应输出。由图 3 可知,汽车在跟踪路线行驶过程中,容易在圆曲线的两侧回旋线段产生横向偏差,图中第一圆曲线两侧的偏差量要大于后面圆曲线处的偏差量,这是因为受回旋线长度与超高的影响,第一圆曲线的回旋线长度小于后者,超高大于后者,2 个设计指标均增大了驾驶负荷,在此路段上行车容易驶入另一车道。但总体上看,偏差值均小于 0.3 m,线形组合有利于行车。

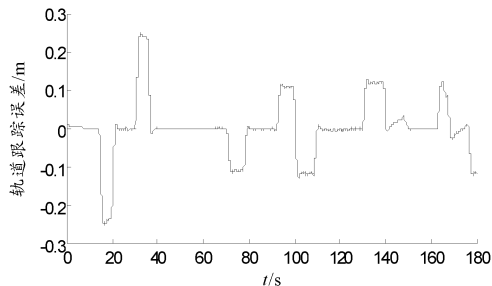


图3 轨道跟踪误差曲线

由图 4 和图 2(b)可见侧向加速度变化与平面线形变化具有一致性,平面线形及超高对汽车的侧向加速度起决定作用,当曲线半径越小、超高越大时,行驶车辆的侧向加速度响应越大,但图中侧向加速度远小于 0.3 g,此平面线形设计指标不会导致汽车侧滑。

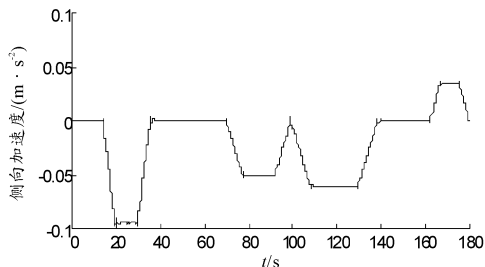


图4 侧向加速度曲线

图 5 显示了路段上驾驶操纵负荷,由图 5(b)可见,在回旋线的两侧驾驶员需要急速调整方向盘以适应路段线形的变化,而其余路段微调方向盘或保持不动,此路段上方向盘峰值转速为 0.2 rad/s,因此不会使得驾驶员感到紧张;从图 5(a)中可见,最大的转向任务间隔发生在第二直线段,为 41 s,接近于门限值,容易诱发单调驾驶,可以适当增长两侧回旋线长度,以减小直线段长度。

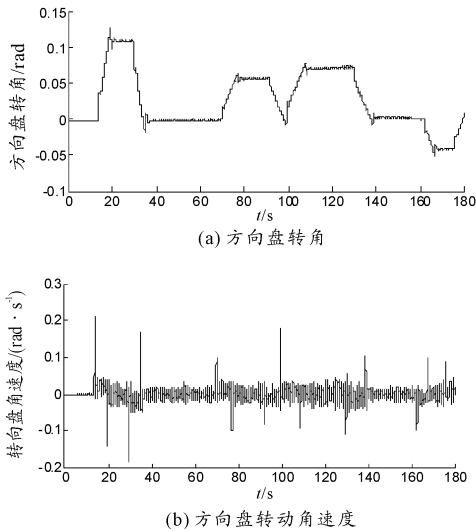


图5 方向盘操纵负荷

轿车在行驶过程中,车轮的垂直荷载总体上呈波动形式,随着道路线形指标的变化,垂直荷载发生转移。图6(a)可见,当经过弯道时,轿车左、右侧车轮荷载差值增大,但此差值较小,不致于引发侧翻事故;而由于受到纵断面竖曲线及坡度的影响,轿车行驶过程中前后轮荷载差值具有较大的变化,在经过第四竖曲线顶点后达最大值,此时前轮荷载为后轮荷载的3倍,每个后轮平均垂直荷载为1.1kN,此处容易导致汽车纵翻,对凸曲线后的制动操作也相当不利。

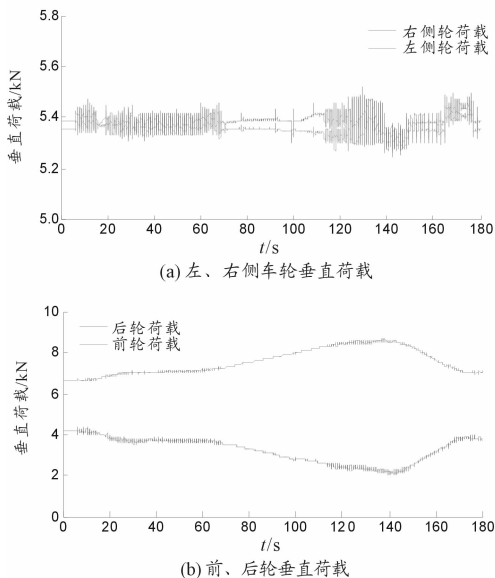


图6 垂直荷载变化曲线

图7为智能驾驶试验所得路段通行极限车速,在各种线形指标综合影响下,道路前段(里程0~2.47 km)容易诱发汽车以较高速度通行,路段最大极限车速达185 km/h,而道路后段的设计指标使得汽车以较低速度通行,为51 km/h。总体上,试验路段的极限通行车速与设计车速有较大差值,路前段(里程0~2.47 km)容易诱发超速行驶,行车速度分布较分散,为事故多发路段;路后段行车较为困难,应优化线形设计指标,加强道路宜人性设计。

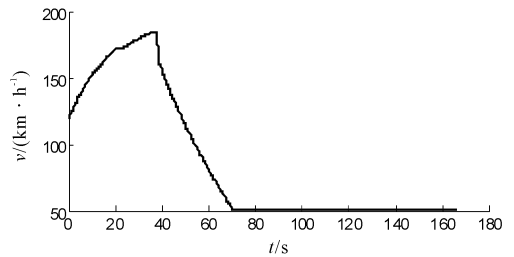


图7 路段通行极限速度

4 结论

1) 基于对公路线形导致交通事故发生的分析,选取了轨道跟踪误差、转向任务间隔、方向盘峰值转速、侧向加速度、垂直荷载和路段通行极限车速为道路线形安全性评价指标。

2) 建立了人-车-路仿真试验环境,其中试验道路是在CAD中完成路线设计方案后,通过EICAD输出相关数据到ADAMS中建立道路模型,此方法保证仿真试验中的道路模型与道路线形设计方案的高度一致性,是道路线形设计安全性评价及优化的基础。

3) 文中对安徽至浙江某高速公路的设计方案进行了安全性评价,多数指标值显示该设计路线安全性较好,但路段通行极限车速显示该路前段(里程0~2.47 km)行车速度分布较分散,容易诱发超速行驶,为事故多发路段。

参考文献:

- [1] Poul Greibe. Accident prediction models for urban roads [J]. Accident Analysis and Prevention, 2003, 35(2): 273-285.
- [2] Karolien Geurts, Isabelle Thomas, Geert Wets. Understanding spatial concentrations of road accidents using frequent item sets [J]. Accident Analysis and Prevention, 2005, 37(4): 787-799.
- [3] 葛如海, 刘志强, 陈晓东. 汽车安全工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] 张景涛, 杨少伟, 潘兵宏. 基于可能速度的公路线形评价标准 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 40-43.
- [5] 杨少伟, 许金良, 杨宏志. 横向加速度变化率在公路设计中控制和评价 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 21(1): 46-48.
- [6] Yumiko M A, Hiroshi T B, Katsuhiko F. Handling qualities evaluation method based on actual driver characteristics [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(9): 807-817.
- [7] 徐进, 邵毅明, 彭其渊. 公路线形的操纵负荷分析及设计控制 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 867-872.
- [8] 赵又群, 郭孔辉. 汽车操纵性评价指标的研究 [J]. 汽车工程, 2001, 23(1): 1-4.
- [9] MSC. Using ADAMS/Solver [M]. Santa Ana, CA, USA: Mechanical Dynamics Inc, 2000.
- [10] 陈军, MSC. ADAMS 技术与工程分析实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

(责任编辑 周江川)