

保密★2 年



A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

# **Vehicle Acceleration and Driving Track Research of Sharp Curves in Mountainous Highway**

School/Department: School of Transportation Engineering

Discipline: Traffic and Transportation Engineering

Major: Road and Railway Engineering

Candidate: Tao Lin

Supervisor: Prof. Xiao-Dong Pan

**March, 2008**



Y1811329

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，  
同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；  
学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、  
数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位  
论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门  
或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，  
学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：林涛

2008年3月20日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：林涛

2008年3月20日

## 摘要

论文在分析总结国内外相关研究的基础上,以山区公路小半径曲线为研究对象,进行了大量的行车实验,研究了曲线路段车辆加速度变化特征及车辆轨迹偏移特征。主要进行了以下内容的研究:

根据加速度变化特征,提出了纵向加速度3阶段变化模型,即预减速阶段、减速阶段、加速度阶段的模型。对每个阶段的表征意义及加速度的基本特征做了分析说明。研究显示:预减速阶段车辆减速度均值在 $-0.2\sim-0.8\text{m/s}^2$ 之间变动,减速阶段减速度均值在 $-0.2\sim-0.6\text{m/s}^2$ 之间变动,减速度均值(绝对值)随车速的增大而增大;加速阶段,车辆加速度均值在 $0.2\sim0.6\text{m/s}^2$ 之间变动,随着加速阶段车速的增大,加速度均值随车速的增大而减小。

在已有研究成果的基础上,以驾驶行为理论及视觉认知理论为基础,提出了基于驾驶员注视范围内视角变化的视觉信息量表达式,并将其应用到曲线段车辆纵向加速度分析中。提出了基于驾驶员视觉信息变化的车辆纵向加速度模型。并考虑曲线段横向力作用的影响,对减速阶段的车辆加速度模型进行了横向荷载修正。基于视觉信息变化的加速度模型可较好地分析车辆的纵向加速度变化规律。

在行车实验的基础上,通过对曲线段车辆横向受力的分析,得到了车辆横向加速度变化率、横向加速度稳定值的计算公式。根据计算公式得到了考虑横向加速度变化率  $LAV$  的缓和曲线最小长度、基于驾驶员可承受横向负荷的圆曲线最小半径等设计指标。可为山区公路小半径曲线的设计提供参考依据。

针对已有研究的不足,考虑山区公路小半径曲线的特点,分析了车辆行驶轨迹的基本特征。研究表明:对于小半径曲线而言,车辆在进入曲线时发生内向偏移,而在驶出曲线时发生外向偏移。进一步的,考虑曲线路段车辆受力特征及驾驶员驾驶行为,分析了横向加速度与车辆轨迹横向偏移的相关性,得到了基于横向加速度的轨迹横向偏移计算模型,计算结果可为曲线路面加宽值提供参考依据。

最后,关于进一步工作的方向进行了简要的讨论。

**关键词:** 山区公路, 小半径曲线, 纵向加速度, 横向加速度, 驾驶员视觉信息,

## 摘要

---

横向力系数，行驶轨迹

## ABSTRACT

Based on the study and research of domestic and foreign material, this paper researched on the vehicle acceleration characteristic and the driving tracks characteristic on sharp curves in mountainous highway. Many driving experiments were carried on the sharp curves. The main conclusions are shown as follow:

Three-phase model was established for the acceleration according to the variation characteristic: prepare deceleration phase, deceleration phase and acceleration phase. Explanation and research were done for each phase. According to the analysis: Under the usual driving condition, the value of deceleration was mostly between  $-0.2 \text{ m/s}^2$  and  $-0.8 \text{ m/s}^2$  and between  $-0.2 \text{ m/s}^2$  and  $-0.6 \text{ m/s}^2$  in prepare deceleration phase and deceleration phase, the value of acceleration was mostly between  $0.2 \text{ m/s}^2$  and  $0.6 \text{ m/s}^2$  in acceleration phase.

A calculation method of driver's visual information based on visual angle was proposed. Applying visual information model to the analysis of acceleration, the power-functional relationship was found between driver's visual information and the driving behavior on the entrance and exit of the sharp curves. In the middle of curves, because of the influence of lateral acceleration, the acceleration model based on visual information and lateral force was established.

Analysis was done for lateral acceleration variation (LAV) and steady lateral acceleration (LA). Estimation of steady lateral acceleration under different speed and different curvature was gotten. Furthermore, results were applied to get the minimum transition curve length and curve radius.

Relationship was established between lateral acceleration and vehicle lateral excursion. Vehicle track excursion model can be applied to improve the curve design and pavement widening.

In the finality, the problems requiring further studies are discussed.

**Key Words:** mountainous highway, sharp curves, acceleration, lateral acceleration, visual information, coefficient of transverse force, driving track

# 目录

第1章 引言 .....	1
1.1 论文研究背景 .....	1
1.2 问题的提出 .....	1
1.2.1 特殊路段驾驶行为研究 .....	1
1.2.2 驾驶员视觉认知理论尚不完善 .....	2
1.2.3 车辆行驶轨迹研究 .....	2
1.3 论文研究目的和意义 .....	2
1.4 国内外相关研究综述 .....	3
1.4.1 国外相关研究状况 .....	3
1.4.2 国内相关研究状况 .....	6
参考文献 .....	11
第2章 车辆行驶稳定性及驾驶员视觉行为特征 .....	13
2.1 车辆行驶稳定性 .....	13
2.1.1 汽车行驶横向稳定性 .....	13
2.1.2 平纵组合下汽车行驶稳定性 .....	14
2.1.3 汽车加减速控制 .....	14
2.2 驾驶员视觉特征 .....	15
2.2.1 视力、静视力、动视力 .....	15
2.2.2 视觉敏感区、视觉焦点区、注视点 .....	17
2.3 视觉认知理论 .....	18
2.4 驾驶行为 .....	19
2.4.1 驾驶行为主因子分析 .....	19
2.4.2 驾驶行为形成模式 .....	20
2.5 影响行车安全的驾驶反应时间 .....	21
2.5.1 驾驶感知反应时间 .....	21
2.5.2 转向反应时间 .....	23
2.5.3 感知前方车辆变化情况 .....	23
2.6 存在的问题 .....	23
2.7 本章小结 .....	24
参考文献 .....	24
第3章 实验设备及方法 .....	25
3.1 车辆加速度测量 .....	25

3.1.1 实验目的 .....	25
3.1.2 实验仪器 .....	25
3.1.3 实验设计 .....	26
3.2 车辆行驶轨迹测量 .....	26
3.2.1 实验目的 .....	26
3.2.2 轨迹测量装置 .....	26
3.2.3 实验设计 .....	27
3.3 被试驾驶员、实验车、道路线形资料 .....	27
3.4 其他注意事项 .....	30
3.5 本章小结 .....	30
<b>第4章 曲线段纵向加速度特征及模型 .....</b>	<b>31</b>
4.1 纵向加速度阶段模型 .....	31
4.2 纵向加速度基本特征 .....	34
4.2.1 预减速阶段纵向加速度基本特征 .....	34
4.2.2 减速阶段纵向加速度基本特征 .....	36
4.2.3 加速阶段纵向加速度基本特征 .....	38
4.2.4 纵向加速度基本特征归纳 .....	40
4.3 驾驶员视觉信息模型 .....	41
4.3.1 线形特征在驾驶员视觉中的反映 .....	42
4.3.2 驾驶员注视范围的确定 .....	42
4.3.3 道路信息量化表达 .....	44
4.3.4 视觉刺激修正系数 .....	49
4.4 基于视觉信息的纵向加速度模型 .....	52
4.4.1 预减速阶段 .....	52
4.4.2 减速阶段 .....	54
4.4.3 加速阶段 .....	55
4.5 横向力作用对纵向加速度的影响 .....	56
4.6 本章小结 .....	58
参考文献 .....	59
<b>第5章 曲线段横向加速度特征及模型 .....</b>	<b>60</b>
5.1 横向加速度变化基本特征 .....	60
5.2 横向加速度分析 .....	61
5.2.1 横向加速度变化率 .....	61
5.2.2 稳态的横向加速度分析 .....	64
5.2.3 横向加速度研究成果应用 .....	66
5.3 车辆行驶轨迹模型 .....	69
5.3.1 已有研究成果总结 .....	69
5.3.2 小半径曲线车辆轨迹位移基本特征 .....	70



## 目录

---

5.3.3 小半径曲线车辆轨迹横向偏移模型 .....	73
5.4 本章小结 .....	78
参考文献 .....	78
第6章 结论与展望 .....	79
6.1 结论 .....	79
6.2 创新点 .....	80
6.3 进一步工作的方向 .....	80
致谢 .....	81
个人简历  在读期间发表的学术论文与研究成果 .....	82

## 第1章 引言

### 1.1 论文研究背景

我国是世界上道路交通事故发生最多的国家, 据统计, 2003 年我国可统计的道路交通事故共 667507 起, 死亡人数 104372 人, 受伤人数 494174 人, 直接经济损失 33.7 亿元。2005 年, 全国共发生道路交通事故 450254 起, 死亡人数 98738 人, 受伤人数 469911 人, 直接财产损失 18.8 亿元。虽然道路交通事故呈逐年下降趋势, 但就绝对数而言, 我国是世界上道路交通事故最多的国家, 而且事故致死率比欧洲发达国家要高 10 倍以上。

交通事故给社会带来了巨大的损失, 开展道路安全领域的研究对减少由于交通事故带来的损失具有良好的社会效益和巨大的经济效益。但是, 从国内外道路安全领域的研究深度和广度来看, 国内虽然意识到交通事故的产生是人—车—路(交通环境)综合作用的结果, 但限于时间、资金、社会对交通安全认识的程度等因素的影响, 针对道路交通事故诱因及相应对策的研究还只是处于初步阶段, 尚有很多技术问题需要解决。

山区地形复杂, 地质结构不良, 山区公路是事故的多发地带, 据统计, 2005 年, 全国公路上发生交通事故 272840 起, 造成 76689 人死亡, 二、三级公路上交通死亡事故最多, 共造成 47448 人死亡, 占总数的 48.1%。开展针对山区特殊地理环境的安全性研究已经刻不容缓, 而曲线路段作为山区公路的事故多发点, 成为研究的重点对象。

### 1.2 问题的提出

#### 1.2.1 特殊路段驾驶行为研究

道路交通环境是一个复杂动态的人机系统。在这个系统中, 驾驶员根据环境信息的变化不断调整并选择适当的操作, 因此这个人机系统是随环境动态变化的。驾驶行为是信息感知、判断决策和动作所组成的一个不断往复的信息处

理过程，是驾驶员对环境信息的反馈和适应。在道路环境信息发生突变的特殊路段，研究驾驶员的驾驶行为，对于行车安全有着重要意义。山区公路小半径路段上，由于驾驶员视距受限、视觉信息突变、同时受横向力作用等影响，驾驶行为与一般平直路段将有很大不同，具有很强的研究意义。

### 1.2.2 驾驶员视觉认知理论尚不完备

世界主要国家交通事故原因调查表明：在人、车、路（包括交通环境）构成的交通系统中，由于驾驶员自身原因导致交通事故的比例约为 70.8%。驾驶员的责任事故主要是在行车过程中的感知、判断和操作三个环节上出现了失误，而在这三个环节中，驾驶员的感知判断失误占到驾驶员失误的 90%。道路交通设施传达给驾驶员的信息，需要驾驶员通过视觉器官来感知、判断并做出反馈，才能发挥作用。因此，研究驾驶员的信息加工机理有利于交通控制与管理，改善行车安全。国内外研究视觉认知的专家心理学对认知信息加工模型进行了许多研究，但到目前为止，尚无成熟理论能完全解释视觉认知，而将认知理论引入驾驶员视觉信息的研究，则还处于起步阶段。

### 1.2.3 车辆行驶轨迹研究

现行的《公路路线设计规范》将道路线形分为直线、圆曲线、缓和曲线三个基本要素，这样的规定是基于车辆动力学提出的，满足了力学安全性的要求，但由于缺乏对平、纵、横三方面构成的立体线形的深入研究，往往忽略了驾驶员与乘客心理、生理特性及视觉需求，其合理性尚需要进一步检验与完善。其次，已有实验研究结果表明，驾驶员在曲线段的车辆轨迹与实际线形存在大的偏差，致使道路线形诱导视线、保障行车安全的作用难以实现，公路的安全性和舒适性也难以得到保证。

## 1.3 论文研究目的和意义

论文的目的在于研究山区公路曲线路段上驾驶员的加减速控制行为，分析驾驶员由于视觉信息变化、受横向力作用下加减速控制的变化情况，以及对车辆行驶轨迹的影响，建立基于视觉信息加工和横向负荷作用的曲线段加速度模

型及行车轨迹模型。一方面可以对山区公路曲线段交通环境的安全性和宜人性进行科学地分析；另一方面对驾驶员的驾驶视觉适应性、横向负荷适应性给予评价，并提出合理建议，进而从人与路协调性方面改善道路交通安全。

通过本论文的研究，一方面将在一定程度上补充完善驾驶行为中有关驾驶员视觉信息的认知理论；另一方面通过系统的对道路环境和驾驶员视觉适应性、横向负荷适应性的研究，合理地进行道路环境设计。

## 1.4 国内外相关研究综述

### 1.4.1 国外相关研究状况

#### 1) 驾驶员视觉需求研究

加拿大 Ryerson 大学的 Easa 教授等人对平纵线形组合下驾驶员的视觉需求（Visual Demand）作了研究，其研究表明，随着平曲线曲率和竖曲线曲率的增大，驾驶员视觉需求增加；同时，年龄也是影响驾驶员视觉需求的重要因素，65 岁以上驾驶员由于视觉受限而承受的工作负荷要比年轻驾驶员高出 35%—40%。由于视觉需求变化与车辆运行速度变化呈现出相同的变化趋势，Easa 等人提出了以驾驶员视觉需求连续性作为道路设计连续性的检验方法。实验使用的驾驶模拟器见图 1.1 所示<sup>[1][2]</sup>。

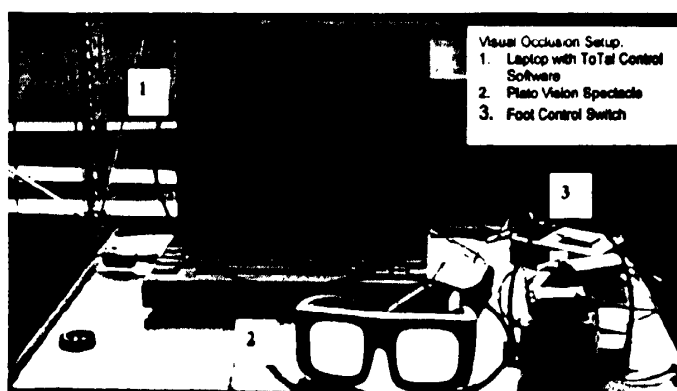


图 1.1 Easa 使用的驾驶模拟装置

佐治亚理工学院的 Wonho Suh 对山区两车道公路曲线段车辆速度、横向位移、驾驶员眼动特征做了相关性研究。其研究的结果表明，在不同曲率半径和照明情况下，驾驶员眼动特征有明显变化。在良好的道路线形和照明情况下，驾驶员注视的随意性较大，而在小半径曲线或者夜间，驾驶员视线区域较为集中，以满足其安全行车需要。实验使用的 Talk-Eye System 如图 1.2 所示<sup>[5]</sup>。

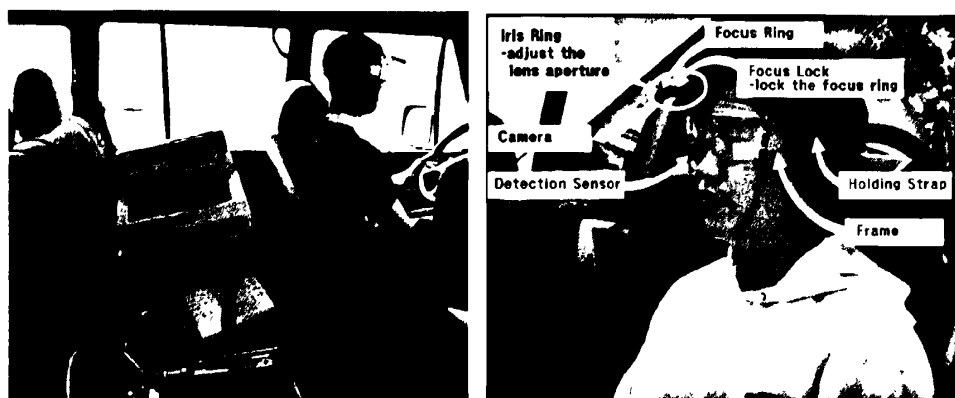


图 1.2 Talk-Eye System 及设备示意图

## 2) 车辆加速度研究

Lamm et al.对连续曲线间的直线长度和简单曲线前后直线长度的取值进行了相关研究，利用 85%位车速和曲线转角对车辆进行分析，研究发现驾驶员在曲线段并非匀速行驶，车辆驶出曲线时速度高于驶入曲线前速度，其值约为  $6.4\sim 8\text{km/h}$ <sup>[8]</sup>。

波多黎各大学的 Figueroa 等人对驾驶员的驾驶行为做了研究，并建立了直线—曲线段的速度变化预测模型。其研究发现，驾驶员在进入曲线前开始减速，在驶出曲线前开始加速；减速段长度的 66%位于曲线前的直线段上，减速度值为  $0.732\text{m/s}^2$ ；加速度长度的 72%位于曲线后直线上，加速度值为  $0.488\text{m/s}^2$ 。图 1.3 所示为 Figueroa 建立的速度模型示意图<sup>[6]</sup>。

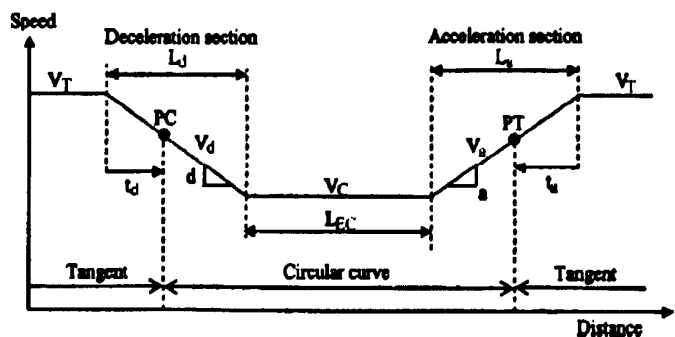


图 1.3 直线 — 曲线加速度模型

3) 车辆轨迹研究

Hideo ARAKI 等人对双车道条件下车辆的行驶状态（位置、速度、加速度）及车辆轨迹进行了相关研究，利用 Kalman 矩阵得到了跟车状态下前车行驶状态（位置、速度、加速度）的预测方法，在此基础上根据车辆的行驶状态进一步预测了在车道上的行驶轨迹，并利用行车实验与模拟分析验证了该预测方法的有效性，实验方法如图 1.4 所示<sup>[9]</sup>。

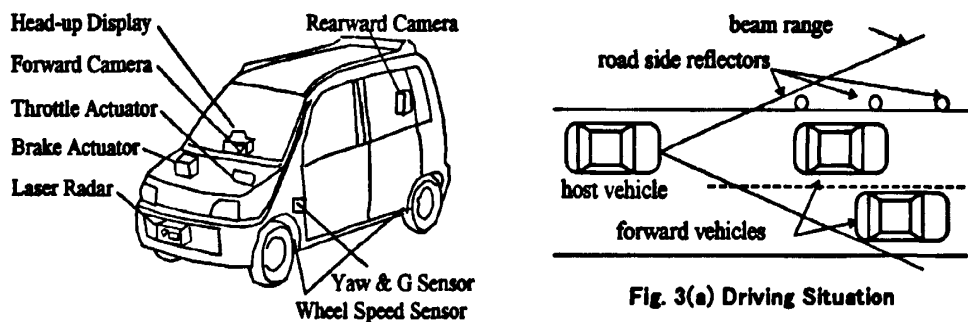


图 1.4 车辆轨迹装置及实验环境示意图

Dulas (1994) 研究了汽车的基本车道保持能力。试验车的左轮要求压线行驶，车速是 57 km/h，Dulas 发现轨迹的偏差平均值为 15cm，标准差为 3.2cm，由此，95% 保证值下的偏差为 ±21cm，99% 保证值下的偏差为 ±23cm。

## 1.4.2 国内相关研究状况

### 1) 驾驶员视觉需求研究

沈利群采用预瞄最优曲率理论,分析了驾驶员前视时间对汽车稳定性的影响,仿真结果表明,驾驶员反应滞后时间越长,系统稳定性的储备越小,车辆行驶越不稳定;而在相同反应滞后时间情况下,前视时间越长,系统越稳定<sup>[26]</sup>。

同济大学的陈雨人教授对不同平纵组合下公路立体线形进行了计算机模拟计算,提出了一种基于透视图图像特征的交通安全审计新方法,并设计了不同速度下满足视距要求的透视图包络线,作为交通安全审计的模板<sup>[21]</sup>。

潘兵宏等人将动视觉原理应用到公路线形设计中。根据驾驶员的动视力、动视野与行驶速度的关系,分析了驾驶过程中驾驶员的动视觉特点,得到了基于驾驶员动视觉的直线长度、平曲线、平面线形组合、平纵组合等公路线形参数,提出了满足动视觉特点的直线长度的合适范围、满足视觉条件的平曲线半径计算公式以及平纵设计中应该注意的问题<sup>[20]</sup>。

同济大学潘晓东教授课题组运用眼动仪开展了驾驶员眼动特性与行车安全的相关性的研究,提出了基于驾驶员瞳孔面积变化速度及持续时间的的行车安全标准,对现有公路隧道进出口运营车速安全性进行了评价;建立了驾驶员瞳孔面积与隧道进出口照度的幂函数关系,解决了隧道进出口照明的问题;针对隧道明暗适应中的视觉震荡现象,选取换算视觉震荡时间作为驾驶员视觉舒适度评价指标,评价了隧道进出口停车视距的安全性;确立了评价驾驶员信息加工水平的视点平面分布的动视点指标,可用于隧道进出口平面线形最小曲线半径的安全性评价<sup>[23][24][25][26][27][28]</sup>。

同济大学杨轶博士提出道路绝对信息变化率、信息变化增长率用于量化评价道路平、纵线形及其组合的优劣,许多以往难以解释的现象(如,曲线长度对车速影响,小偏角问题,驾驶员在入曲线和出曲线所承受的不同心理负担等)得到合理的解释<sup>[22]</sup>。

### 2) 车辆加速度研究

同济大学高建平、郭忠印等人分析了高速公路车辆的运行速度,建立了车辆运行车速和加速度与公路线形之间的模型,从行车安全的角度将线形单元间

运行车速和加速度的变化量作为线形质量评价的标准，用以进行公路线形设计质量的定量评价<sup>[11]</sup>。

长安大学的杨少伟等人提出考虑平、纵、横三方面关系的横向加速度变化率研究，认为汽车在平、纵曲线组合的线形上行驶时，有向合成坡度方向倾斜的趋势，从而人在汽车上也会感到有向合成坡度方向倾斜趋势。因此，提出用平、纵两方面组合的舒适性指标描述舒适程度，在此基础上，提出以可能速度进行线形检测的方法<sup>[12]</sup>。

国内高振海等人建立了一个描述驾驶员控制汽车速度行为的数学模型—驾驶员最优预瞄纵向加速度模型，并对汽车加速和减速状态下的驾驶员—汽车—道路闭环系统进行模拟计算，从数字仿真角度描述了驾驶员根据前方路况、自身前视特点、滞后特性及对汽车动力学响应特性的了解，通过控制油门和制动踏板进而控制汽车速度的行为特性<sup>[16]</sup>。

同济大学潘晓东对山区公路曲线段的车辆横向力系数与驾驶员的生理指标进行了研究，从人机工程学的角度，对曲线路段车辆横向力系数的取值进行了研究，其研究结果表明横向力系数一般不大于 0.2 为宜<sup>[29]</sup>。

### 3) 车辆轨迹研究

长安大学林广宇等人通过车载 CCD 图象传感器获得序列图象，应用数字图象理解和计算机视觉技术，建立摄像机的透视投影模型和汽车行驶轨迹模型，根据平面图像上的点推导出车辆在空间道路上的实际位置，对车辆行驶过程中相对于道路标线的行驶轨迹进行研究，用以判断驾驶员压线行驶、越线行驶与逆向行驶等违章行为，如图 1.5 所示。使用该方法对摄像机进行初始化校准和标定时，要求标定精度极高，否则最终处理得到的数据误差太大，难以满足轨迹分析要求<sup>[10]</sup>。

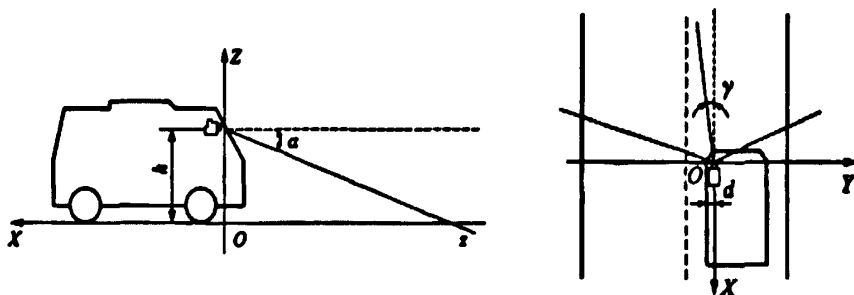


图 1.5 摄像机安装示意图



吉林工业大学的管欣等人利用预瞄最优曲率模型和系统模糊理论，建立了驾驶员动态决策汽车预期行驶轨迹的模糊决策模型，并进行了驾驶员在多种典型路况下的仿真计算<sup>[18]</sup>。

吉林大学魏丽英等人利用线性跟驰理论中“刺激—反应”模式对驾驶员变化车道的行为进行模拟分析，认为驾驶员是否进行车道变换主要取决于跟驰行驶的相邻两辆车之间的车速和距离。模拟过程中，认为每个车辆必须估计它在当前时段内的目标车速，为了达到目标车速应选用的加速度以及车辆在哪个车道内运行等。模拟结果表明，车道变换次数随多车道平均车头时距的增加而增加，并且驾驶员总是希望在能以较高车速行驶的车道上运行，即在允许的范围内尽量提高车速是驾驶员进行车道变换的主要动机<sup>[15]</sup>。

同济大学杨轸博士对曲线路段车辆的行驶轨迹进行了实验及仿真研究。研究表明，在进入曲线段时，车辆一般总是先朝内侧偏移，在驶出曲线时，一般朝曲线的外侧偏移。图 1.6 所示为在曲线半径为 250m 曲线上的驾驶仿真轨迹图<sup>[19]</sup>。

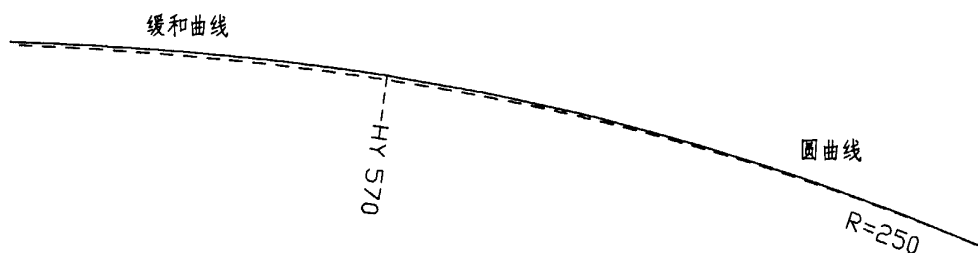


图 1.6 驾驶仿真轨迹图 (R=250m)

## 1.5 论文选题的确定

已有研究成果，为论文研究的开展奠定了理论基础及实验依据，具有指导意义。但应该注意到，已有成果的资源还是非常有限的，针对特殊路段（比如小半径曲线）加减速控制行为的研究还极其有限，而将驾驶员视觉信息引入驾驶行为的研究还处于室内仿真模拟阶段，缺少实际行车实验研究支撑。由于理论的不完善和实际实验条件的限制，研究成果有一定的局限性。

驾驶员作为人—车—路道路交通系统的主体，其重要性受到越来越多学者的关注。近年来潘晓东研究组在基于人机工程学的道路交通环境安全评价研究中，重点开展了驾驶员心理生理反应与道路线形构造的实验研究。研究表明道路线形控制性设计指标（如曲线半径、视距、平曲线段横向力系数）同驾驶行车宜人性密切相关。不合理的线形设计和交通环境，使驾驶员承受了很大的心理压力和生理负担，造成了行车的不安全因素。充分发挥研究组的研究优势，开展基于视觉信息加工、横向负荷适应性的行车安全模型研究，可以在一定程度上弥补交通安全领域应用基础研究的不足。

## 1.6 技术路线

国内将驾驶员视觉特性和生理心理反应直接应用到道路安全评价或行车安全的研究仍然较少，国外虽然早已开展了驾驶员视觉方面的研究，但绝大多数以实验室仿真研究为主，实际的行车实验研究资料较少，且难以获得。因此，本研究可能会遇到较大的困难。

研究采用“以驾驶行为理论和视觉理论为指导，以实测数据为基础，以计算机辅助和数学建模为手段”的技术路线，如图 1.7 所示。

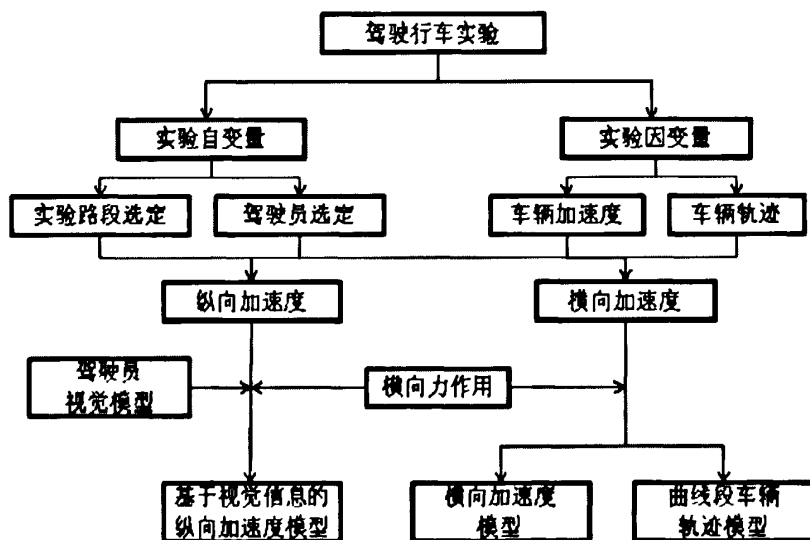


图 1.7 研究技术路线

## 1.7 本章小结

本章主要对以下问题进行了阐述和分析：

### 1、论文的研究背景

开展针对山区特殊地理环境的公路安全性研究已经刻不容缓，而曲线路段作为山区公路的事故多发点，成为道路交通安全研究的重点对象。目前，对于曲线段驾驶员视觉特性、驾驶行为特性、车辆行驶状态的研究仍然较少，而实际的行车实验资料则更加难以获得。

### 2、论文的研究目的

研究山区公路曲线路段上驾驶员的驾驶行为，分析驾驶员由于视觉信息变化、受横向外力作用下驾驶行为的变化情况，以及对车辆行驶轨迹的影响，建立基于信息加工和横向负荷作用的曲线段行车模型。

通过本论文的研究，将在一定程度上补充完善曲线段驾驶员驾驶行为理论；同时通过对驾驶员视觉适应性、横向负荷适应性的研究，合理地进行道路环境设计。

### 3、国内外的研究

介绍了国内外在驾驶员视觉需求、车辆加速度特性、车辆行驶轨迹方面的研究成果，对本研究的开展具有指导意义。但应该注意到，已有成果的资源非常有限，绝大部分是针对曲线段的室内仿真模拟成果，缺少实际行车实验研究的支撑。由于理论的缺陷和实际实验条件的限制，研究成果有一定的局限性。

### 4、本研究主要内容

- 1) 通过山区公路行车实验，分析车辆加速度变化情况，建立曲线段加速度变化模型。
- 2) 考虑曲线路段驾驶员视觉特性，引入视觉信息量化表达式，同时考虑驾驶员横向负荷，分析评价曲线段车辆加速度变化特征，建立基于驾驶员视觉信息及横向负荷的纵向加速度模型。
- 3) 建立曲线段车辆横向加速度变化模型和横向力作用下曲线段车辆行驶轨迹模型。

## 参考文献

- [1] Easa, S. M. and Ganguly, C. (2005). Evaluation of driver mental workload on complex highway alignments. *J. Transp. Eng.* 131(8), 583-590.
- [2] Said M. Easa and Wenlong He (2006). Modeling driver visual demand on three-dimensional highway alignment. *J. Transp. Eng.* 132(5), 357-365
- [3] Krammes, R. et al. (1995). Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [4] Tsimhoni, O. and Green, A. (1999). Visual demand of driving curves as determined by visual occlusion. *Proc., Vision in Vehicles 8 Conf., Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.*
- [5] Wonho Suh, Peter Young-Jin Park, Chang Ho Park and Kyung Soo Chon. Relationship between Speed, Lateral Placement, and Driver's Eye Movement at Two-Lane Rural Highways. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 8, August 1, 2006.
- [6] Alberto M. Figueroa Medina, Ph.D., P.E. and Andrew P. Tarko, Ph.D. Speed Changes in the Vicinity of Horizontal Curves on Two-Lane Rural Roads. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133, No. 4, April 1, 2007.
- [7] Misaghi, P., and Hassan, Y. (2005) . Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 408-418.
- [8] Lamm, R., Psarianos, B., and Mailaender, T. (1999) . Highway design and traffic safety engineering handbook, McGraw-Hill, New York.
- [9] Araki, Hideo, Hiroshima, Yasuhisa, Ito, Toshio. Estimation of preceding vehicle's driving state [CA]. *Proceedings of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC*, 242-247
- [10] 林广宇, 魏朗. 基于数字图像技术的汽车行驶轨迹状态识别[J]. *交通运输工程学报*. 2006, 6 (3): 114-117.
- [11] 高建平, 郭忠印. 基于运行车速的公路线形设计质量评价[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*. 2004, 32 (7): 906-911.
- [12] 杨少伟, 许金良, 杨宏志, 潘兵宏. 横向加速度变化率在公路设计中的控制和评价. *西安公路交通大学学报*[J]. 2001, 1: 46-48
- [13] 廖朝华. 基于运营安全的山区高速公路路线设计新理念[J]. *公路*. 2004, 4: 52-55
- [14] 王军雷, 李百川, 应世杰等. 车道变换碰撞预警分析及最小纵向安全距离模型的研究[J]. *人类工效学*. 2004, 12: 16-19
- [15] 魏丽英, 隗志才, 田春林. 驾驶员车道变换行为模型分析[J]. *中国公路学报*. 2001, 1: 77-80
- [16] 高振海, 管欣, 李谦, 郭孔辉. 驾驶员最优预瞄纵向加速度模型[J]. *汽车工程*. 2002, 5: 434-437
- [17] 陈涛, 魏朗. 道路行车安全性虚拟评价方法研究[J]. *安全与环境学报*. 2006. 12: 115-118
- [18] 管欣, 高振海, 郭孔辉. 汽车预期轨迹驾驶员模糊决策模型及典型路况仿真[J]. *汽车工程*. 2001, 1: 13-17
- [19] 杨轶. 行车动力学仿真模型研究. 同济大学博士学位论文. 2004, 3

- [20] 潘兵宏, 赵一飞, 梁孝忠. 动视觉原理在公路线形设计中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 11: 20-24
- [21] 陈雨人. 一种基于图像特征的高速公路交通安全审计的辅助方法[C]. 国际公路安全研讨会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2005, 10: 234-239
- [22] 杨轸, 潘晓东, 方守恩, 郭忠印. 基于道路特征信息变化率的公路线形质量评价[J]. 公路交通科技. 2006, 23(10): 1-5.
- [23] 潘晓东, 郭雪斌. 驾驶员注视点与行车安全实验研究[A]. 上海市公路学会第七届年会学术论文[C]. 2005: 255-260.
- [24] 杜志刚, 蒋宏, 潘晓东. 眼动仪在道路交通安全与环境评价中的应用[A]. 第三届全国公路科技创新高层论坛论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 2006.4: 893-899
- [25] 潘晓东, 杜志刚, 杨轸等. 动视点指标与隧道进出口平曲线半径[J]. 同济大学学报(自然科学版)(录用)
- [26] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 公路隧道进出口行车安全的视觉适应指标[J]. 华南理工大学学报, 2007, 35(7): 15-19
- [27] 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): 101-105
- [28] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 高速公路隧道进出口视觉适应实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1988-2001
- [29] 潘晓东, 林涛, 杨轸. 驾驶员心率血压变动与山区公路横向力系数关系[J]. 同济大学学报, 2006, 34(6): 748-751.
- [30] 沈利群. 驾驶员前视距离对汽车稳定性的影响[J]. 上海应用技术学院学报. 2003, 3: 73-76

## 第2章 车辆行驶稳定性及驾驶员视觉行为特征

### 2.1 车辆行驶稳定性

汽车行驶稳定性是指汽车在行驶过程中，在外部因素作用下，汽车保持正常行驶状态和方向，不致失去控制而产生滑移、倾覆等现象的能力。

影响汽车行驶稳定性的因素主要有汽车本身的结构参数、驾驶员的操作技术以及道路与环境等外部因素作用。以下从力学平衡原理分析汽车行驶稳定性。

#### 2.1.1 汽车行驶横向稳定性

汽车在平曲线上行驶时会产生离心力，方向水平背离圆心。离心力对汽车在平曲线上行驶的稳定性影响很大，可能使汽车向外侧滑或倾覆。为减少离心力的影响，保证汽车在平曲线上稳定行驶，当曲线半径较小时，设计上常把平曲线上路面做成外侧高、内侧低呈单向横坡的行驶，如图 2.1 所示。

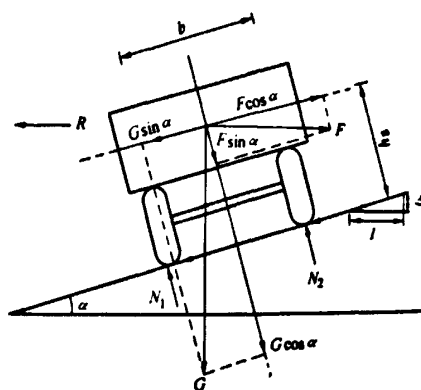


图 2.1 曲线上汽车受力分析

离心力是汽车行驶的不稳定因素。由于同样大小的力作用在不同重量汽车上其稳定程度是不一样的，于是采用横向力系数来衡量，其意义为单位车重受到的横向力<sup>[1][8]</sup>，即：

$$\mu = \frac{V^2}{127R} - i_h \quad (2-1)$$

横向力越大,汽车在平曲线上的横向稳定性越差。在实际设计过程中,只要 $\mu$ 值小于横向附着系数,一般在满载情况下能够保证横向行车的稳定性。

$\mu$ 值过大,汽车不仅不能连续稳定的行驶,有时还需要减速。在曲线半径小的弯道上驾驶员要尽量大回转,容易离开行车道发生事故。当 $\mu$ 值超过一定竖直时,司机就需要注意采用增加汽车稳定性的措施,这一切都增加了驾驶者在弯道行驶的紧张。对于乘客来说, $\mu$ 值越大,同样感到不舒适,据有关资料,乘客随 $\mu$ 的变化其心理反应如下:

当 $\mu < 0.10$ 时,不感到有曲线存在,很平稳;

当 $\mu = 0.15$ 时,稍感到有曲线存在,尚平稳;

当 $\mu = 0.20$ 时,已感到有曲线存在,稍感不稳定;

当 $\mu = 0.35$ 时,感到曲线存在,不稳定;

当 $\mu \geq 0.40$ 时,非常不稳定,有倾车的危险感。

研究指出, $\mu$ 的舒适界限,由0.11到0.16随行车速度而变化,设计中对高、低速采用不同设计值。

### 2.1.2 平纵组合下汽车行驶稳定性

汽车行驶在具有一定坡度的小半径平曲线上时,较直线上增加了一项弯道阻力。对于上坡的汽车耗费的功率增加,使行车速度降低。对下坡的汽车有沿平纵组合的合成坡度方向倾斜、滑移和装载偏重的可能,这对汽车的行驶是危险的。为此,对合成坡度的最大值加以限制,以利于行车的稳定性。汽车沿平纵组合方向的稳定条件表示为<sup>[1]</sup>:

$$i \leq i_{\max} - \frac{V^2}{127R} i_h \quad (2-2)$$

### 2.1.3 汽车加减速控制

汽车的实际加速度,尤其是在交通流中相对于常态运行时的加速,要比车辆固有的加速能力低,尤其是载客汽车。在速度大于48km/h的情况下,理想的

加速度范围在  $0.6\sim0.7\text{m/s}^2$  之间。另有资料表明驾驶员在“不紧急”的情况下更倾向于使用车辆极限加速度的 65% (大约  $1\text{m/s}^2$ )，而不是用车辆的额定加速度。而当驾驶员在十字路口或者交通控制装置前停车时，受控制行为提供的大约  $-0.2\text{g}$  ( $1.96\text{m/s}^2$ ) 的减速率是一个合理的较低水平，用这个减速率几乎所有的驾驶员能改变车的速度到理想状态。但是，更理想的减速度大约为  $-0.3\text{g}$ ，相当于  $3\text{m/s}^2$ 。

公路项目安全性评价指南 (JTG/TB05-2004) 中提供了平直路段上的推荐加速度值，如表 2.1 所示<sup>[5][6]</sup>，但《指南》中未对曲线路段的加速度做说明。

表 2.1 平直路段上期望运行速度和推荐加速度值

车型	小客车	大货车
期望运行车速 $V_e$ (km/h)	120	75
推荐加速度值 $a_o$ ( $\text{m/s}^2$ )	0.15-0.50	0.20-0.25

2.2 驾驶员视觉特征

人能够根据眼镜获得的视觉信息进行加工和解释，从而更深刻地认识客观事物，这就是人的视知觉能力。例如当汽车在山区弯道上行驶时，由于山坡的遮挡，驾驶员眼镜看到的只是弯道的一部分，但驾驶员根据自己的经验知道，道路并非到此为止，而是继续向前延伸。这样，驾驶员通过自己的视知觉，对山区弯道这一客观事物有了全面的认识。

2.2.1 视力、静视力、动视力

视力(Vision)也叫视敏度，是指分辨细小的或遥远的物体或物体细微部分的能力。在一定条件下，眼睛能分辨的物体越小，视觉的敏锐度越大，视敏度的基本特征在于辨别两点之间距离的大小，因此，也可以把它看作视觉的空间阈限。眼识别远方物体或目标的能力称为远视力，识别近处细小对象或目标的能力称为近视力。在健康检查时，主要是检查远视力。远视力低于 1.0 (对数视力表低于 5.0) 的称为视力不良或视力低下(习惯称视力减退)。

医学界用视力表测定视敏度，它是以视角的倒数来表达的，其公式为：

$$V(\text{视敏度})=\frac{1}{\alpha} \tag{2-3}$$



如图 2.2 所示是视角和网膜映像关系图，物体 AB 通过节点 n，形成物体的视网膜映像。对象与眼睛所成的张角，叫做视角。视角的大小决定映像在视网膜上投射的大小。

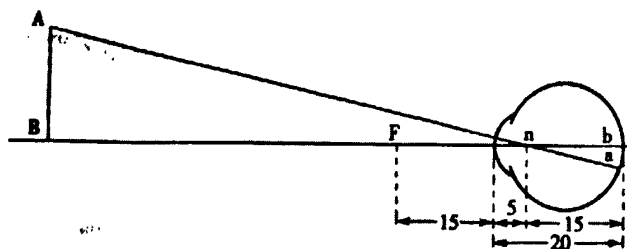


图 2.2 视角和网膜映像关系示意图

驾驶员视力检查的结果，只表明人眼在注视点处的分辨能力。偏离注视点的能力大大下降，如图 2.3 所示。因此，人们为了看清楚物体必须转动头部和眼球，使自己的注视点对准要看的目标。

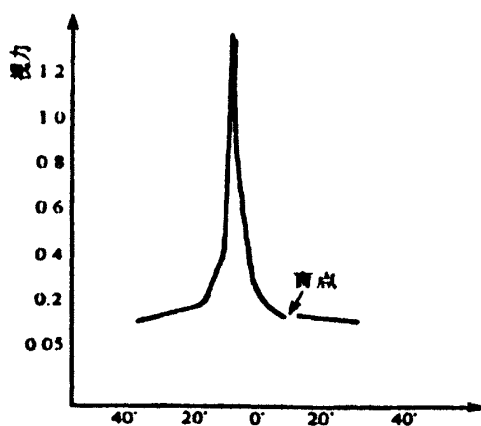


图 2.3 人眼注视点附近视力变化

**静视力 (Static Visual Acuity)** 是指人和视标都在不动状态下检查的视力。

**动视力** (Dynamic Visual Acuity) 是指人和视标处于运动 (其中的一方运动或两方都运动) 时检查的视力。汽车驾驶员在行车中的视力为动视力, 动视力一般小于静视力。

被观察的目标运动或观察者运动都会引起视敏度降低，运动速度越快视敏度降低越多。一个静态视敏度为 1.2 的人，当观察角速度为 140 弧度每秒的运动

目标时，其视敏度会下降到 0.2 以下。

根据有关实验资料分析，行驶速度增加，动视力降低。驾驶员视力与汽车行驶速度的关系见表 2.2 所示。

表 2-2 驾驶员视力—车速变化

a) 驾驶员的各种视力随车速提高的降低率									
分类	眼睛与对象物的关系	视 力 率 降 低			分类	眼睛与对象物的关系	视 力 率 降 低		
		车速 30km/h	车速 50-60 km/h	视力			车速 30km/h	车速 50-60 km/h	视力
静止 视力	人和物体 都静止	—	—	—	物动 视力	只有物 体运动	约10%	10%以下	低于人 动视力
人动 视力	只有人 运动	5%以下	5%-6%	与静视 力相近	全动 视力	人和物 体都动	—	—	最低
b) 驾驶员视力与安全运行车速的关系									
视力	安全运行速度	安全感			视力	安全运行速度	安全感		
1. 0	50km/h以上	安全、舒适			0. 5	20-30km/h	产生危险感，小心驾驶		
0. 75	30-50km/h	产生不安感，不舒服			0. 25	20km/h以下	显著危险感，无法驾驶		

2.2.2 视觉敏感区、视觉焦点区、注视点

从心理学和美学角度来讲，视觉是具有选择性的。视觉是一种积极的感受行为，不仅与物理和生理因素有关，在相当程度上也取决于心理因素。

人们在观察和理解图像时能够不自觉地对其中某些区域产生浓厚兴趣，把这些区域称为“视觉敏感区”，而将其中产生最强烈兴趣的区域称为“视觉焦点区”。虽然现实中人们由于个人修养和审美观的不同，甚至情绪的影响，对同一幅图像的评价会产生较大的偏差，但是对于图像中关注的区域却是具有共性的，它们集中传递了整个图像所要表达的客观信息。

驾驶员在驾车行驶时，视线总是对准所注意的某一点，这一点就是眼睛的注视点。注视点对于行车安全意义重大，在交通管理上如交通标志通过色彩，形状等引起驾驶员的足够注意，起警戒提示作用；另一方面，如果让驾驶员过多的关注驾驶行为以外的内容，则会给行车安全带来隐患。根据俄罗斯的研究，注视距离、视野和车速有如表2.3所示的关系。

表 2.3 车速与注视距离关系

车速 (km/h)	40	60	80	100	120
视野 (°)	100	86	60	40	22
注视距离 (m)	180	335	477	564	710

2.3 视觉认知理论

国外心理学关于人的认知信息加工模型主要有：感觉的强度的变化和刺激的变化关系方面的 Fechner 定律（对数定律）和 Stevens 定律（幂定律），知觉选择模型：（a、单通道过滤器模型 b、衰减模型），反应选择模型，注意能量有限理论，认知负荷理论等<sup>[10]</sup>。到目前为止，尚无成熟理论能完全解释视觉认知。

1、关于感觉强度的变化和刺激的对数变化关系的模型

1) Fechner定律（对数定律）

心理学上用下列公式表示函数关系：

$$S = K \lg R \tag{2-4}$$

式中：S — 感觉大小（以jnd 为单位）

R — 刺激强度，

K — 常数

我们可将这个公式理解为为：感觉的强度的变化和刺激的对数变化成正比。

2) Stevens 定律（幂定律）

史蒂文斯提出了刺激强度和感觉量之间关系的幂定律（the power law）：

$$S = bI^a \tag{2-5}$$

式中：S — 物理量I 的幂函数；

b — 量表单位决定的常数；

a — 感觉道和刺激强度决定的幂指数，幂函数的指数值决定着按此公式所画曲线的形状。

2、注意模型

视觉信息加工的核心问题是注意，包含有视觉信息的选择及加工时间的长短，注意理论的主要模型如下：

主要有知觉选择模型（过滤器模型与衰减模型）、反应选择模型、注意能量有限理论、特征整合论、认知负荷理论、空间频率多道理论等。

## 2.4 驾驶行为

车辆在行驶过程中，驾驶行为是信息感知、判断决策和动作所组成的一个不断往复的信息处理过程。首先是道路上来往车辆、行人、道路交通标志、路面状况以及车辆本身的运行状况等外界信息，通过驾驶员的视觉、听觉和触觉等感觉器官传入驾驶员的大脑，驾驶员依据其驾驶经验予以加工后，做出相应的判断和决策，然后通过手、脚等运动器官发出调整方向和速率等指令，从而改变汽车运动状态。而汽车行驶轨迹、相对道路的适应程度、振动、速度以及各种操纵后汽车的行驶变化再通过上述过程反馈给驾驶员，同时驾驶员仍在不断接受道路环境信息，调节自身驾驶状态以适应新的道路环境信息，确保汽车的操纵稳定性、可靠性和安全性<sup>[4][7]</sup>。

### 2.4.1 驾驶行为主因子分析

通过统计学的主因子分析方法对影响驾驶行为的各个因子做了分析，发现主因子主要受驾驶状态、速度判断、操纵机能、稳定性、心理机能、制动失效、加减速不当、抢道行驶、路面不良、气候条件、视力、动视力、转向故障、道路设计不合理等制约。进一步的解释如下：

- 1) 汽车人机界面质量。汽车行驶速度和车辆间距等影响到驾驶员感知、判断决策和动作时间的适宜，从而延长驾驶员的复杂反应时间，出现对车速和距离判断的差错，导致驾驶员时间裕度不足而降低汽车的操纵稳定性和安全性。同样，汽车驾驶室低水平的人机工程设计和成员的干扰也会制约驾驶员的安全驾驶能力。
- 2) 操作频率。在道路环境条件恶劣及紧急情况下，由于操作频率的增高而使驾驶员处于高度紧张状态，此时驾驶员的安全驾驶能力将受到影响。
- 3) 差错后果危险性。驾驶员在行车时，尽管出现的每个差错不一定直接诱发道路交通事故，但该动作的后果危险性却制约驾驶员感知、判断决策和动作的准确，同时也波及与之相关的其它车辆驾驶员或行人，甚至影响到整个道路

交通系统可靠性和安全性。

- 4) 生理心理机能。汽车驾驶时脑力和体力的综合作业，较长时间行车，易引起驾驶员生理心理机能的恶化，导致驾驶员视力、自感应激和活动能力的下降，从而出现对信息感知、判断和处理失误。
- 5) 道路环境状况。如果道路环境缺乏良好的视认性和诱导性，很容易引起驾驶员的错觉，而道路交通信号、标志、弯道、树木等也会制约驾驶员安全驾驶能力。

## 2.4.2 驾驶行为形成模式

如果在描述驾驶行为时不考虑驾驶状态意识，那么根据对道路交通系统中驾驶行为的理论分析，结合驾驶行为形成主因子的定量化辨识结果，建立的驾驶行为形成模式如图 2.4 所示。

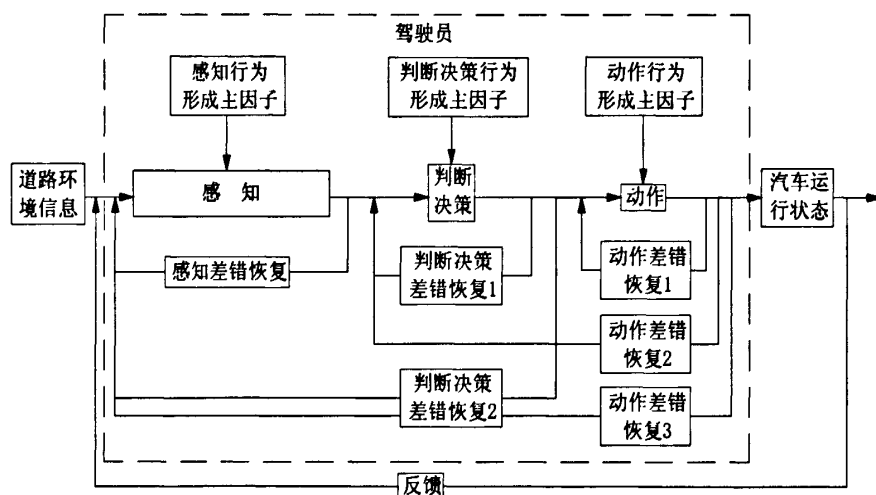


图 2.4 驾驶行为形成模式

道路上来往的车辆、行人、道路交通标志和汽车的行驶方向、速度等外界环境信息，首先经过驾驶员的感知阶段，由于受感知行为形成主因子的制约，往往会出现感知差错，驾驶员依恢复能力对感知差错予以恢复或部分恢复后，通过感知到判断决策阶段，同样因判断决策行为形成主因子的影响，仍会出现判断决策差错，驾驶员依感知—判断决策和判断决策两种途径将差错予以恢复

或部分恢复后，经判断决策到动作阶段，由于同样的原因，也会出现判断决策差错，此时依据感知—判断决策—动作、判断决策—动作和动作三种方式进行差错的恢复或部分恢复，从而实现对汽车的驾驶。然后，汽车运行状况和后续道路环境信息再反馈传递到驾驶员，驾驶员依上述过程进行新的信息加工，直至驾驶结束。

## 2.5 影响行车安全的驾驶反应时间

### 2.5.1 驾驶感知反应时间

1950 年，Hick-Hyman 建立了一个反应时间和可选择的数目之间的一个理论关系<sup>[1]</sup>，如下：

$$RT = a + bH \quad (2-6)$$

其中：RT — 反应时间（秒）；

H — 信息传递估计。如果 N 为等概率的几个选择，那么  $H = \log_2 N$

a — 这种状况下的最小反应时间

b — 经验斜率，多数情况下约为 0.13 秒

根据刹车反应的各个组成部分Hooper and McGee (1983) 提出了一个刹车反应时间链，如下表所示：

表 2.4 Hooper的刹车反应时间链

组成	时间	累积时间
感知潜伏时间	0.31	0.31
眼球运动时间	0.09	0.4
固定时间	0.2	1
感知时间	0.5	1.5
开始踩刹车	1.24	2.74

上述每一组成部分都是来自实验数据，表中列出的是 85%分位的值，但并不是每个驾驶员在每一部分都采用 85%分位的值，因此，1.5 秒的感知时间是相当地高的。这一感知时间代表最简单的反应时间，并且什么也不做。很多的学者如 Neuman(1989)，提出感知反应时间（PRT）是随环境的变化而变化的，

如在低交通量的公路上，其值是 1.5 秒，而在城市快速路是 3.0 秒。这是因为城市道路上比乡村道路有更多的交通信息要注意，更多的决策要实行。

Johansson、Rumer（1971）和 Lerner（1995）等的研究都表明，反应时间较短的驾驶员要比反应时间长的驾驶员所占的比例要大。Subramanian（1996）的研究也表明了同样的观点，他认为驾驶员的反应时间服从对数正态分布，如图 2.5 所示。

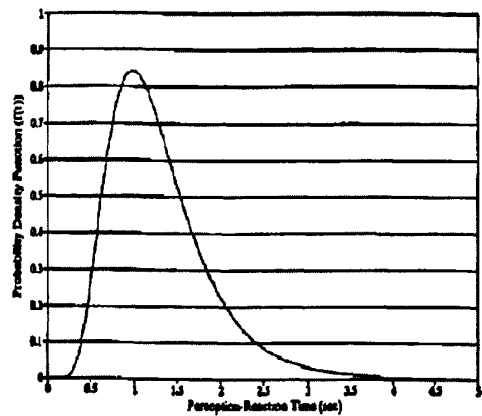


图 2.5 驾驶感知反应时间分布图

Lerner 和他的助手(1995)，对两种条件下反应作了研究，这两种情况是：(1) 驾驶员不知道什么时候和是否刹车刺激会发生。(2)驾驶员被告知有刹车信号的发生，但不知道什么时候会出现。下表是实验结果。

表 2.5 刹车感知时间（对数正态分布）

类型	"Surprised"	"Expected"
平均值	1.31（秒）	0.54（秒）
标准差	0.61	0.1
$\lambda$	0.17（无量纲）	-0.63（无量纲）
$\xi$	0.44（无量纲）	0.18（无量纲）
50%分位	1.18	0.53
85%分位	1.87	0.64
95%分位	2.45	0.72
99%分位	3.31	0.82

其中的 95%分位值很接近 AASHTO 在估计公路上停车视距时所采用的时间 (2.5s)。

### 2.5.2 转向反应时间

Summala(1981)研究了在被测试车辆的侧前方的车辆突然打开车门情况下,司机的反应情况。被测车辆是在不知情的条件下进行实验的。结果发现:驾驶员的反应是旋转方向盘进行避让,平均反应时间是 1.5 秒,到达最大侧向位移的时间是 2.5 秒。实际上这一平均反应时间包括感知时间和动作时间。根据表 2-6,取“Surprised”情况下平均反应时间为 1.31 秒,而人的反应时间约为 0.2 秒左右,因此由此推算出的旋转方向盘反应时间为 1.51 秒,可见两者的数据非常接近。

### 2.5.3 感知前方车辆变化情况

当前方一个物体以均匀的速度接近时,视角的变化从接近线形变化发展到类似几何变化。视角的变化大致与产生这种变化的时间成反比。人类对一个运动物体的加速度感知是比较粗的和不精确的。前方车辆的运动状态的变化被感知存在一个角度门槛值,1988 年 Mortimer 在避免车辆碰撞的研究中估计:当前后车间距变化 12%时,运动车辆上的驾驶员能够感受到这种车间距的变化,同时,他估计角度门槛值为 0.0035 弧度/秒。这就是说,在小于或等于 5.6 秒的时间内,前方车辆与本车的距离变化 12%,驾驶员就可以感觉得到。

## 2.6 存在的问题

以上对有关车辆行驶稳定性及驾驶员视觉行为特征的理论及相关指标进行了整理归纳,以下对其中存在的不足进行简单评价总结:

当前针对小半径曲线上车辆的加减速特征的研究仍然比较少,国外虽然进行了相关研究并给出了指标建议值,但应考虑到我国环境因素及研究条件的不同予以谨慎对待。另外,我国的《公路项目安全性评价指南》中只提供了平直路段上的加减速推荐值,尚缺少曲线路段的相关推荐指标。

其次,驾驶员认知理论及视觉行为理论基础仍不完善,使用的分析指标也比较单一,难以全面反应问题。应根据研究需要对特定区域选择不同的指标进行深入分析。



## 2.7 本章小结

本章对车辆行驶稳定性、驾驶员动态视觉、驾驶行为、视觉行为模式等做了详细的理论阐述,系统归纳了与驾驶员视觉行为模式有关的基础理论和应用研究。同时指出了当前研究中尚需完善的问题,为后续研究提供理论依据和研究基础。

## 参考文献

- [1] 张雨化主编. 道路勘测设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997
- [2] 杨治良 著. 实验心理学[M]. 浙江: 浙江教育出版社, 1998
- [3] 姚泰主编. 生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2003
- [4] 王武宏, 孙逢春, 曹琦, 刘淑艳 著. 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
- [5] 中华人民共和国交通部, 公路项目安全性评价指南(JTG/TB05-2004). 北京: 人民交通出版社, 2004
- [6] 中华人民共和国交通部, 公路工程技术标准(JTG B01-2004). 北京: 人民交通出版社, 2004
- [7] 戴彤宇, 徐慧智, 裴玉龙. 驾驶员感知特性及对策研究. 国际公路安全研讨会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2001, 10: 377-382
- [8] 艾国和, 乔维高, 李孟良等. 车辆行驶运动学参数构成分析[J]. 公路交通科技, 2006.23(2):154-157
- [9] 黄木. 行车中的危险错觉[J]. 安全监理, 2002, 12: 137
- [10] 梁广宁 著. 当代认知心理学[M], 上海: 上海教育出版社, 2003: 28-30
- [11] 杨轸. 行车动力学仿真模型研究. 同济大学博士学位论文. 2004, 3

## 第3章 实验设备及方法

### 3.1 车辆加速度测量

#### 3.1.1 实验目的

汽车在进出曲线时，往往要做加速或减速运动以满足汽车行驶的需求。而山区公路小半径曲线常是事故多发点，因此有必要对汽车在曲线上行驶的动力特征做调查和研究。实验通过记录汽车在多个曲线路段上（包括一个事故黑点）加速度的变化情况，分析加速度的变化特征，寻找其与道路安全的关系，为安全评价与改善提供依据。

#### 3.1.2 实验仪器

通过采用课题组杨轸博士自行研发的三轴加速度仪（专利编号：200520046765.5）对行驶中车辆的径向、侧向和垂直三个方向的加速度进行实时测量。该设备体积小，安装方便，采集频率高（实验设置为 50HZ），而且能方便地与笔记本电脑进行连接，进行实施的数据记录。同时，还有专门的程序对数据进行分析 and 计算。该仪器如图 3.1 所示。

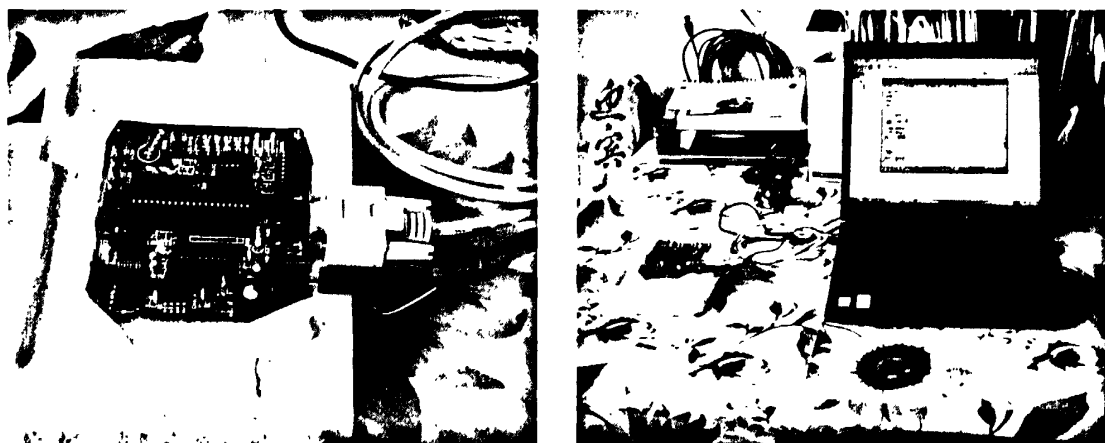


图 3.1 三轴加速度记录仪

### 3.1.3 实验设计

选择浙江 S06 省道建德段为实验对象, S06 省道实验桩号为 K1+870-K7+320。

为了准确及时地反映曲线路段车速变化情况, 实验对自身车辆的加速度进行测量, 实验步骤如下:

1) 把加速度仪安装在实验车上, 注意保证加速度仪的大致水平。把笔记本电脑与加速度仪进行连接, 用于实时的数据采集和通讯。

2) 在平直的道路对加速度仪及车辆进行标定, 获取仪器安装位置初始值, 车辆对加速度仪的车速修正值和加速度修正值。

3) 在选择的曲线上进行实验。通过笔记本的键盘可以控制加速度仪的启动、暂停和停止, 此外, 还可以在任意需要的时刻进行标记。在标记特定点时, 同时记录下车辆车速表中的读数, 以便给出一个初始值和方便比较。

为了减少道路交通环境对行车实验的干扰, 突出道路线形对驾驶员驾驶行为的影响, 实验选择在小交通量的条件下进行。对于实验中由于其他车辆影响而造成的数据失效, 在分析时进行剔除。实验要求驾驶员以平时正常速度行驶。

## 3.2 车辆行驶轨迹测量

### 3.2.1 实验目的

驾驶员根据前方道路信息对车辆的预期行驶轨迹进行判断和优化, 并根据自身驾驶经验及车辆行驶状态, 从众多的轨迹集中选择出最优轨迹, 以此规范汽车的行驶。本项研究的目的在于通过测量汽车在曲线及相邻路段的行驶轨迹, 寻求车辆轨迹与车辆加速度、驾驶员视觉特征之间的内在关系, 研究结果可为道路平面设计理论以及安全评价的研究提供参考。

### 3.2.2 轨迹测量装置

为了准确的测量车辆行驶轨迹, 实验中参考水枪的设计原理, 设计了简易实验装置, 如图 3.2 所示。通过对容器施加压力, 使容器内的液体沿着细管持续的向外流动, 流动的液体喷洒在路面上, 则显示出连续的、清晰的车辆轨迹。

将细管喷射端口固定在车头中央位置，通过测量地面上液体距离道路中线（边线）的距离，可得到车辆的行驶轨迹。

现场实验获得的车辆行驶轨迹图如图 3.3 所示，从实际效果看，该简易装置获得的轨迹图像清晰、连续，精度高。



图 3.2 轨迹测量装置

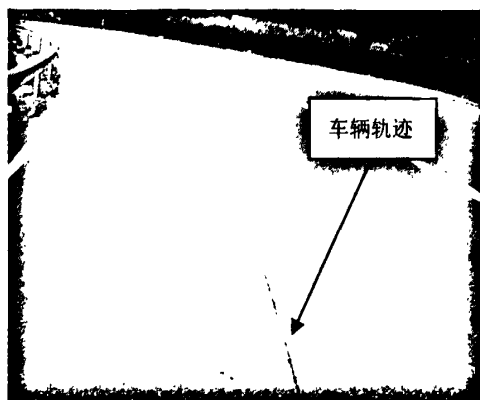


图 3.3 实验现场车辆轨迹

### 3.2.3 实验设计

车辆轨迹实验与加速度实验同时进行，便于协同控制与分析。由于实验条件的限制，为了清楚的反映曲线上行车轨迹的变化规律，选取了 S06 省道上的 3 个小半径曲线进行研究。对于单个曲线，在曲线直缓点前 50m~100m 处开始记录轨迹数据，在缓直点后 50m~100m 处停止记录。每间隔 20m 记录一个点的轨迹线到中线、边线的距离，同时在曲线特征点位置进行标定。最后将轨迹数据保存，供后期分析使用。

## 3.3 被试驾驶员、实验车、道路线形资料

根据实验设计的思路，本次研究共选择了驾龄不同的 2 名驾驶员作为实验人员。驾驶员的相关信息如表 3.1 所示。

表 3.1 驾驶员基本信息表

编号	性别	年龄	驾龄	身高	体重	车辆
Z	男	35	7	175	65	马自达
L	男	25	1	170	60	马自达

实验路段以浙江省 S06 省道建淳线（建德段）改造工程为研究对象，桩号为 K1+870—K7+320。该路段为山区 2 级公路，双车道，有一个小半径曲线是事故黑点，具有较高研究价值。工程竣工线形数据如表 3.2 所示。

表 3.2 S06 省道建淳线（建德段）改造工程平曲线要素表

JD 编号	转角	R (m)	ls (m)	L (m)	曲线起止桩号			
					ZH	HY	YH	HZ
1a	-98/19/47	39	0	66.93	K1+870.13		K1+937.06	
1b	-28/10/46	250	0	100.82	K1+937.06		K2+038.48	
2	-6/23/40	700	0	78.12	K2+141.8		K2+219.92	
3a	69/34/38	200	50	242.67	K2+353.88	K2+403.88	K2+589.77	K2+596.63
3b	14/48/37	600	86.6	166.83	K2+596.63	K2+608.29	K2+676.78	K2+763.38
4	79/7/40	80	55	165.48	K2+924.72	K2+979.72	K3+035.2	K3+090.2
5	-123/58/55	65	50	190.65	K3+157.82	K3+207.82	K3+298.47	K3+348.47
6	-65/5/35	240	50	314.23	K3+566.46	K3+616.46	K3+830.74	K3+880.74
7a	44/48/00	461.56	102.43	412.09	K3+917.57	K4+019.99	K4+329.66	
7b	84/45/35	110	50	187.73	K4+329.66		K4+467.39	K4+517.39
8a	-106/27/45	145	50	294.45	K4+573.61	K4+623.61	K4+868.04	
8b	-20/25/15	479.62	90.93	216.37	K4+868.04		K4+993.48	K5+084.41
9	-11/9/25	230	35	79.79	K5+085.24	K5+120.32	K5+130.11	K5+165.11
10a	112/25/15	140.86	38.31	295.53	K5+364.35	K5+402.66	K5+659.88	
10b	62/36/35	270.4	53.08	322.02	K5+659.88		K5+928.83	K5+981.91

第 3 章 实验设备及方法

11	-136/52/20	60	60	203.33	K6+026.67	K6+086.67	K6+170	K6+230
12a	78/05/33	95	35	137.93	K6+480.31	K6+515.31	K6+609.79	K6+618.24
12b	78/05/33	73	60.68	129.42	K6+618.24	K6+648.16	K6+686.97	K6+747.65
13	-161/10/05	40	30	142.52	K6+842.99	K6+872.99	K6+955.51	K6+985.51
10	-23/46/25	500	50	251.46	K7+060.25	K7+110.25	K7+267.71	K7+317.71

注：JD 编号 13 为事故多发位置

实验路段线形如图 3.4 所示，部分路段的实景图见图 3.5—图 3.6 所示。

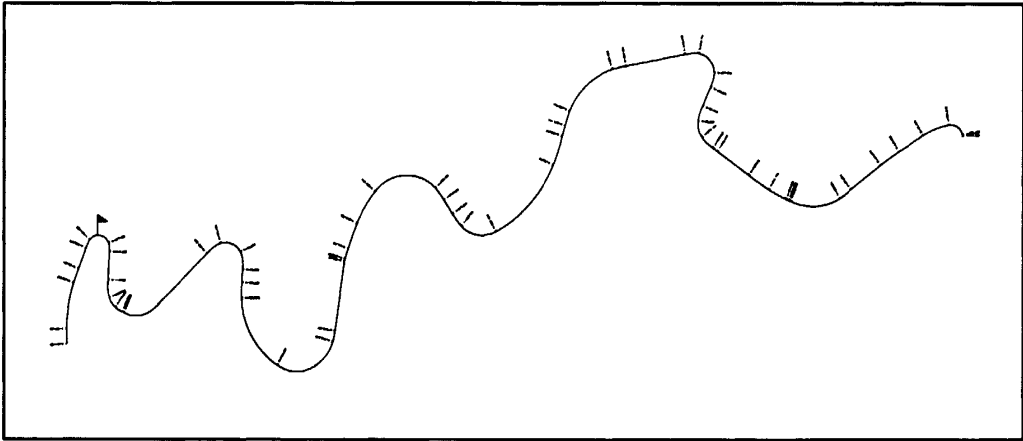


图 3.4 S06 省道建淳线（建德段）改造工程平曲线线形



图 3.5 S06 省道（桩号 K6+900）



图 3.6 S06 省道（桩号 K3+150）

### 3.4 其他注意事项

- 1) 选择比较晴朗的天气进行实验。
- 2) 实验选择在交通量较低的时候进行,以减少交通流对实验时行车车速的干扰。
- 3) 控制实验进行的时间,以减少实验中驾驶疲劳对实验结果的影响。在大约10km的路段上驾车行驶一个来回,大约半个小时左右。
- 4) 为了保证各仪器在实验起点上的一致性,在实验开始时应准确核对或者记录仪器特定的标记时间。
- 5) 不明确告知实验驾驶员的实验目的,确保驾驶员接近正常的行驶心理。
- 6) 为了减少不必要的因素对行车时驾驶员心理和视觉特性指标的影响,行车实验一旦开始后,要求驾驶员专心驾车和车内其他人员保持安静。

### 3.5 本章小结

本章涉及到论文中的各项实验内容。从实验仪器的原理及功能出发,介绍了各项实验的目的及各项实验设计;同时,对于实验路段的选取和实验驾驶员的选择以及实验中的注意事项也做了简单说明。

## 第 4 章 曲线段纵向加速度特征及模型

车辆在曲线段行驶，驾驶员的操作一般由转向操作及速度控制构成。转向操作受到曲线线形特征的约束，而速度控制则反应了驾驶员对当前车辆行驶状态的判断和对未来车辆行驶状态的预测。加速度是驾驶员速度控制的最直接体现，直接影响曲线上车辆的行驶速度，因此，对加速度的研究具有重要的意义。一般的，不考虑垂直向的振动，加速度可以分为纵向加速度及横向加速度两类。纵向加速度由驾驶员的驾驶操作(加油门、踩刹车)产生，反应了驾驶员在动作执行阶段的驾驶行为；横向加速度则是由曲线段离心力作用产生，与道路线形密切相关。本章就纵向加速度变化特征作研究分析。

### 4.1 纵向加速度阶段模型

车辆行驶在曲线路段上，由于线形变化、视线受限等原因，驾驶员会集中注意力，同时控制车速，使车辆安全经过曲线。图 4.1 为车辆以设计速度经过山区小半径曲线时纵向加速度变化的典型示意图。从纵向加速度变化看，车辆在曲线上行驶的变化趋势表现为：在进入曲线前（在 ZH 点之前），车辆开始减速，在驶出曲线前（HZ 点），车辆开始加速。

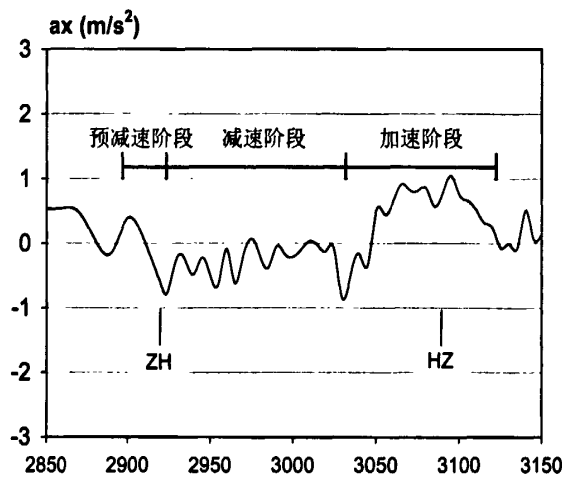


图 4.1 纵向加速度 AX 变化示意图



实验研究发现,曲线上车辆的纵向加速度变化具有阶段性特征,故可对其进行阶段划分。在对实验数据进行分析处理的基础上,可以归纳总结出曲线段车辆加速度阶段模型,即:

在正常行驶条件下(照度良好,路面条件良好,交通量较小,车辆车速不高),车辆在曲线上行驶的纵向加速度可分为3个阶段,即:

1. **预减速阶段:**驾驶员发现前方曲线路段并准备降低车速。该阶段起始位置一般位于曲线 ZH 点之前,加速度特征表现为:加速度值由正变负,并持续减小,加速度呈现线性递减规律,一般可达到减速过程的减速度最大值。整个阶段车辆加速度变化剧烈,车辆处于快速减速行驶状态;
2. **减速阶段:**车辆驶入曲线路段,进一步降低车速。该阶段以预减速阶段结束时刻为起始(即最大减速度点附近),加速度特征表现为:车辆加速度稳定为负值,有小范围波动。随着速度的持续降低,加速度有缓慢上升趋势。整个过程车辆加速度变化较为平缓,车辆处于缓慢减速状态;
3. **加速阶段:**车辆即将驶出曲线,车辆开始加速。该阶段起始位置一般位于圆曲线后缓和曲线段,加速度特征表现为:车辆加速度开始由负转正,并持续增大至某一稳定值后保持不变,车辆最终处于匀速或者匀加速行驶状态,直至驾驶员再次发现前方曲线路段开始减速为止。

从驾驶员角度考虑,可以将纵向加速度变化3阶段模型做如下理解:预减速阶段是驾驶员对前方曲线路段道路信息进行判断并采取初始减速操作的阶段;减速阶段是驾驶员维持车辆保持减速状态,安全通过曲线的阶段;加速阶段是当车辆车速降低至安全通过曲线段后,驾驶员根据其自身期望速度而采取相应加速操作的阶段。

1) 超速行驶现象

由于山区公路多依山傍水而建，线形多以曲线为主，前后曲线间直线段较短，多不足百米，个别地段甚至不足 50m，曲线前后平面线形对驾驶员操作有很大影响，对于个别曲线而言，车辆甚至还未出曲线便进入下一次的减速度过程。从实验数据分析，当车辆高速（ $V > 60\text{km/h}$ ，设计速度为  $40\text{km/h}$ ）通过曲线时，并不出现稳定的减速阶段，而是以较大的减速度值降低车速，并且在短时间内直接由减速状态过渡到加速状态，整个过程车辆加速度波动幅度非常剧烈，车辆处于不稳定行驶状态，如图 4.2 所示。

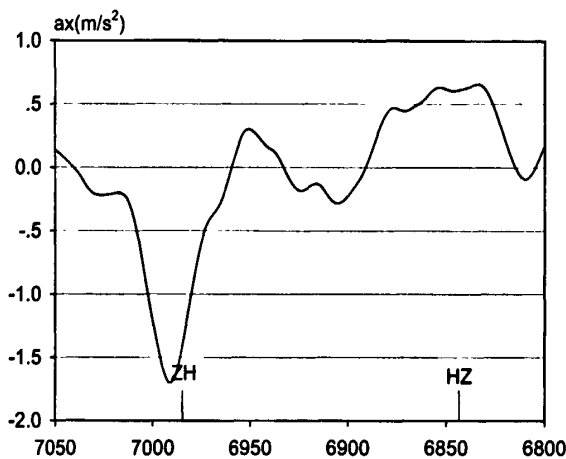


图 4.2 车辆高速通过曲线的纵向加速度变化

对于如图 4.3 所示的这种高速下的不稳定行驶状态，要和正常行驶条件下的加速度分析区别对待，以避免对数据分析结果的影响。

2) 多次减速现象

研究中发现，当车辆以较高速度通过小半径曲线时，纵向加速度变化存在多次减速过程，如图 4.3 所示。这就是有经验的驾驶员日常驾驶过程中经常使用的“点刹”操作，这是一种非常有效、安全的速度控制行为，是驾驶经验对驾驶行为的影响结果。

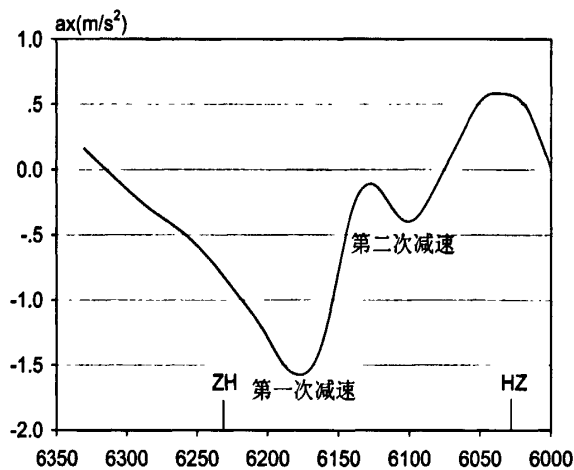


图 4.3 曲线上车辆的二次减速特征

4.2 纵向加速度基本特征

4.2.1 预减速阶段纵向加速度基本特征

预减速阶段是驾驶员对前方曲线路段道路信息进行判断并采取初始减速操作的阶段。在这一阶段，驾驶员发现前方曲线路段并开始减速，这是车辆减速过程的第一个阶段。在这个阶段，车辆行驶状态变化剧烈，车辆速度快速降低，车辆减速度呈现线性递减的变化趋势。

图 4.4 所示为预减速阶段不同半径曲线上车辆减速度随车速的变化图。从图中统计结果可以发现，减速度值大部分处于 $-0.2\sim-0.8\text{m/s}^2$ 之间，有个别样本由于车速过高，得到的值较大。

预减速阶段，减速度变化特征有较为明显的规律性。对于小半径曲线而言，车辆驶入曲线的速度越大，则减速度均值也就越大；并且曲线半径越小，减速度减小的速率也就越大，如图中所示， $R=40\text{m}$  曲线上车辆减速度变化速率明显较快。而当半径增至一定程度后，减速度均值差别较小，图中所示在  $R=60\text{m}$  和  $R=80\text{m}$  两个曲线上，减速度均值相差已经很小。

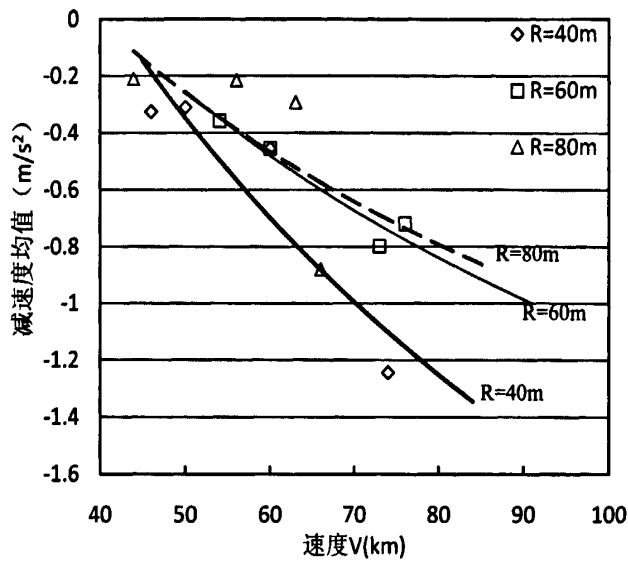


图 4.4 预减速阶段减速度均值—车速

图 4.5 所示为不同半径曲线上减速时间与车辆初始速度关系图。一般的，随着车辆进入曲线的初始速度的增大，所需要的减速时间也就越长。不考虑个别车速较高的情况，预减速阶段所需的减速时间一般在 3~6s。

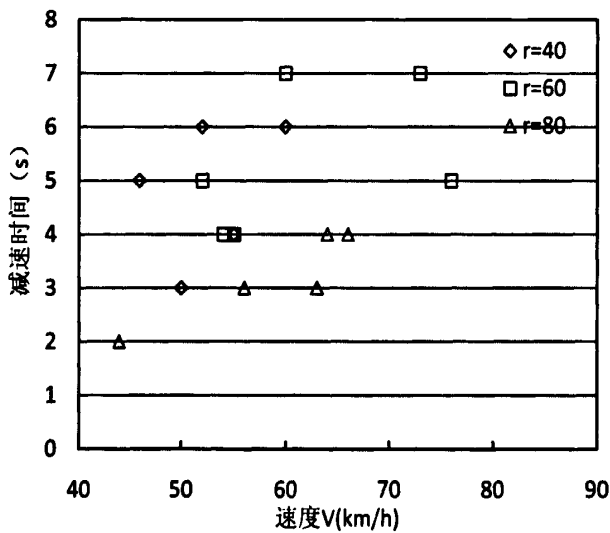


图 4.5 预减速阶段减速时间—车速

从统计的数据看，减速时间变化规律性不明显，时间跨度范围较大，这是由于减速时间在很大程度上受到驾驶行为的影响，驾驶员可以在很长一段距离内用较小的减速度降低车速，相应的减速时间也就较长，或者在很短的距离内以很大的减速度降低车速，则相应的减速时间也就越短。

4.2.2 减速阶段纵向加速度基本特征

车辆经过预减速阶段加速度的急剧变化后，进入变化相对平缓的减速阶段。此时，车辆基本处于曲线的圆曲线部分，曲率恒定，加速度及速度变化平缓，整个阶段车辆仍处于减速状态，减速度呈现逐渐上升趋势，车辆减速过程即将结束。在减速阶段，驾驶员受到的离心力作用明显增大，生理负担进一步增强。

减速阶段车辆的加速度变化情况比较复杂，这是因为在实际的行车过程中，减速阶段是紧随预减速阶段发生的，预减速阶段减速度特征对减速阶段的加速度有明显影响。同时，若车辆驶入曲线的速度较高，在减速阶段还会出现多次的连续减速过程。为便于分析，选择具有共性的减速度均值作为研究对象。

图 4.6、图 4.7 所示为减速阶段减速度均值统计情况。从数据统计结果看，这一阶段减速度的值基本位于区间-0.2~-0.6m/s<sup>2</sup>。并且随着车速的增大，减速度值也逐渐增大。

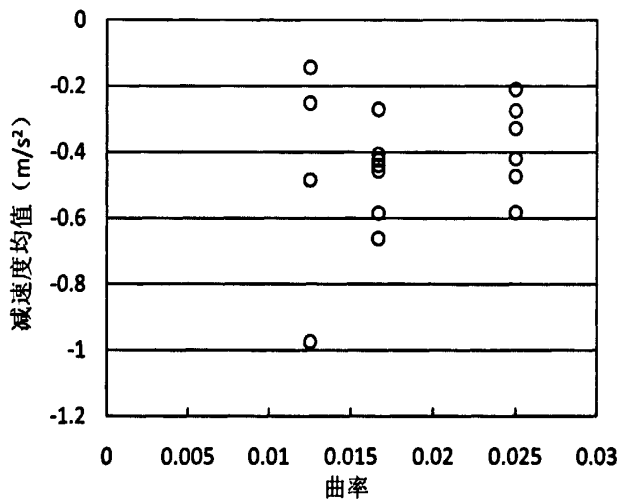


图 4.6 减速阶段减速度均值—曲率

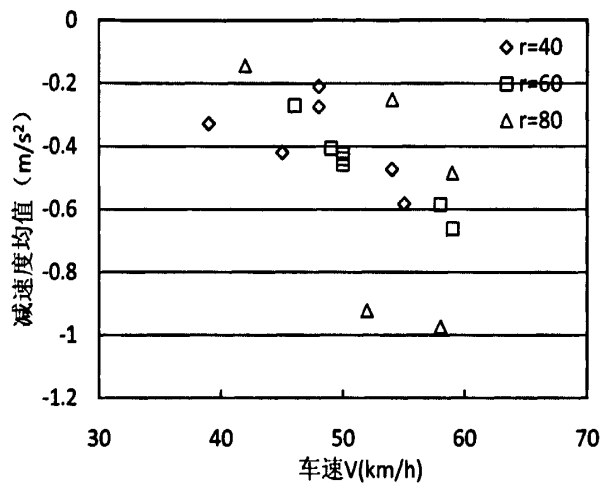


图 4.7 减速阶段减速度均值—速度

从图 4.6 中可以得知，随着曲线曲率的增加，减速度分布的范围逐渐集中，减速度值在区间-0.2~0.6m/s<sup>2</sup>内小幅波动，反映出在半径较小的曲线上，驾驶员的驾驶行为比较一致，这可能是由于半径较小曲线对驾驶员产生的危险感觉相对强烈，为保障行车安全，驾驶员的注意力更为集中，相应的驾驶操作也更规范。而在半径为 80m 曲线上，车辆减速度变化范围较大，反映出在半径相对较大的曲线上，驾驶员驾驶操作自由度较大。

同预减速阶段减速度特征比较，减速阶段减速度变化比较平缓，曲率对车辆加速度的影响不明显。这是因为一方面，经过前期预减速阶段的减速过程，车辆车速降低明显，车辆安全通过曲线的要求基本可以实现，通过快速减速降低车速的必要性不再显著；另一方面，从驾驶员自身而言，由于驾驶适应性和驾驶习惯的影响，倾向于以一定大小的减速度安全通过曲线。

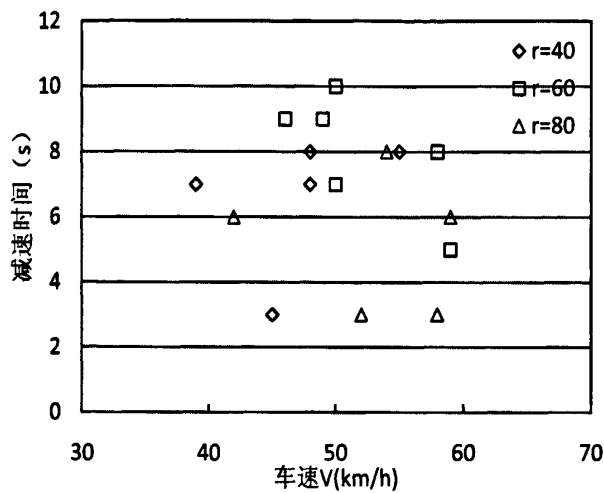


图 4.8 减速阶段减速时间—车速

图 4.8 所示为减速阶段减速时间与车速关系图。同前面的预减速阶段减速时间特征类似，减速阶段减速时间的变化规律性也不明显。进一步分析发现，在半径较小的曲线上 ( $R=40\text{m}$ )，减速时间分布比较集中，在区间  $6\sim 8\text{s}$  内变化。而在半径较大曲线上 ( $R=80\text{m}$ )，减速时间在区间  $2\sim 8\text{s}$  内变化，并且减速时间分布则比较分散。

4.2.3 加速阶段纵向加速度基本特征

车辆车速降低至满足安全通过曲线要求后，进入加速过程。通常，加速点的起始位置位于圆曲线后缓和曲线上，此时驾驶员基本顺利通过圆曲线路段，由于曲率对驾驶员影响程度降低，横向力作用影响逐渐减小，并且视距增大，驾驶员安全感明显增大。同时，由于此时车辆速度较低，受驾驶习惯影响，驾驶员试图尽快驶出曲线进入前面直线。从加速度特征看，加速度呈现出线性增加变化特征，并逐渐增大至一恒定值，车辆做匀加速运动。

加速阶段加速度特征与前面减速过程减速度特征相关，同时受到前面路段线形的影响，某些样本中车辆加速度变化波动变化较大。考虑加速度变化共性，选择了减速阶段结束后的第一次加速过程为研究对象，其变化特征为：车辆加速度由零线性增加至某恒定值，并保持该恒定值运动一段距离。

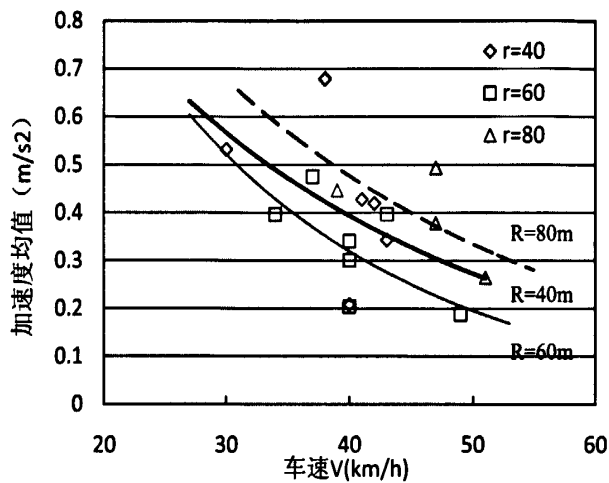


图 4.9 加速阶段加速度均值—车速

图 4.9 所示为加速度阶段不同半径曲线上加速度均值随车速变化情况。从图中可知，在加速度阶段，车辆加速度和曲率之间并不存在比例关系，表明曲率对加速度均值的影响作用已经不明显。随着加速度阶段起始点速度值的增大，车辆的加速度值反而减小，这与减速阶段减速度变化特征相反。从数据统计的情况看，加速度阶段加速度均值大多位于区间  $0.2\sim0.6\text{ m/s}^2$ 。

加速度变化特征可以从驾驶行为理论方面得到很好的解释。一般的，受到驾驶适应性和驾驶习惯的影响，驾驶员总是倾向于以一种稳定的，大小固定的速度行驶，这里将这种速度暂命名为驾驶员的期望速度。如果在某时刻车辆的车速小于驾驶员的期望速度，那么驾驶员就会采取加速操作，从而使车辆速度达到其自身适应的期望速度。在加速阶段的起始位置，由于经过了前面的减速过程，车辆速度降低较多，小于驾驶员的期望速度，故驾驶员会采取加速操作。车辆速度偏离期望速度越多，则驾驶员为了达到期望速度，需要使用更大的加速度，相反的，车辆速度偏离期望速度越小，则驾驶员采用较小的加速度加速。



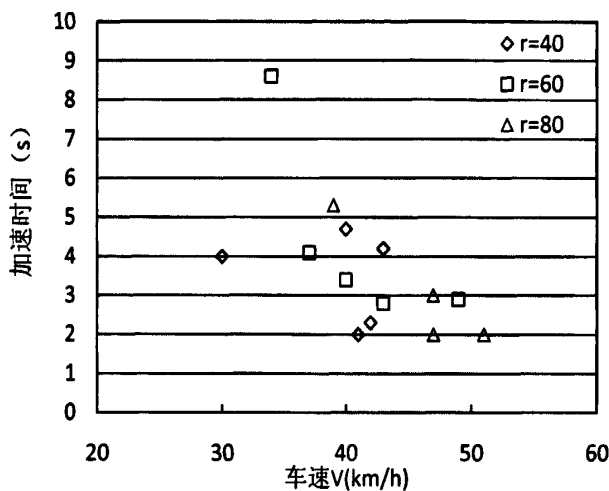


图 4.10 加速阶段加速时间—车速

图 4.10 所示为加速阶段不同半径曲线上加速时间随车速变化图。从图中分析，加速时间的基本变化规律为：随着车辆速度的增大，加速时间减小。从驾驶行为分析，车辆速度越大，则与驾驶员期望速度偏离越小，驾驶员所需要的加速时间也就越少。反之则越多。从数据统计的情况看，加速阶段第一次加速时间一般集中在区间 2~5s 之间。

4. 2. 4 纵向加速度基本特征总结

对纵向加速度各个变化阶段的加速度变化特征做了分析，对表征加速度的特征量，如加速度均值、加速时间做了统计分析，结果表明在小半径曲线路段：

- 1. 预减速阶段，车辆减速度均值一般位于区间-0.2~-0.8m/s<sup>2</sup>之间，随着车辆驶入曲线的速度越大，减速度均值（绝对值）也就越大，并且半径越小，减速度减小速度也就越快；
- 2. 减速阶段，车辆减速度均值一般位于区间-0.2~-0.6m/s<sup>2</sup>之间，随着车速的越大，减速度均值（绝对值）也就越大，并且随着曲线曲率的增加，减速度分布的范围逐渐集中，反应了半径大小对驾驶行为的影响。同预减速阶段相比，减速阶段曲率对车辆减速度的影响相对较小，这是由于车速降低和驾驶习惯的原因所致。
- 3. 加速阶段，车辆加速度均值一般位于区间 0.2~0.6m/s<sup>2</sup>之间，随着加速

阶段车辆速度的增大,加速度值逐渐减小,这是受到车辆车速与驾驶员期望速度的偏离程度以及驾驶员驾驶适应性的影响所致。

4. 加减速时间方面,预减速阶段和减速阶段减速时间变化规律性不明显,减速时间跨度较大。加速阶段加速时间相对集中,一般位于区间 2~5s 之间。

受实验条件限制,对加速度特征值(加减速度均值、加减速时间)的统计结果只能反应车辆加减速变化的大致范围,与 Figueroa 等人的研究结果比较,实验统计结果还是合理可信的。

从上述分析看,单纯的从线形特征或者车辆行驶状态等方面研究车辆的加速度,很难对不同阶段的加速度变化特征进行解释说明,特别是对加速时间的解释更是难以深入。究其原因,在于加速度受到驾驶员驾驶行为影响。驾驶员是驾驶行为的执行者,其驾驶行为是建立在驾驶员对环境信息的处理和预判之上的,而道路环境,行驶状态并不直接对加速度产生作用。由于人的感觉操作行为具有模糊性和不确定性,很难精确的与客观的外界环境一一对应,所以从道路线形方面的研究难以深入,需要寻找其他更为有效的分析方法。

### 4.3 驾驶员视觉信息模型

车辆的加减速反映了驾驶员对道路环境的判断和对车辆行驶状态的控制。因此,研究车辆的加减速特征可从驾驶员的驾驶行为入手。驾驶行为是信息感知、判断决策和动作所组成的一个不断往复的信息处理过程。驾驶员的判断、动作等均是建立在对环境信息的感知基础上的,环境信息的变化将直接影响驾驶员的操作行为。

已有研究表明,驾驶员获取的信息有 80%来自于视觉。因此,可通过研究曲线上驾驶员的视觉信息变化,分析及评价车辆的加减速变化特征。同济大学杨轶博士在其博士论文《行车动力学仿真模型研究》中提出了一定车速下道路信息量的计算表达式,并将道路绝对信息变化率、信息变化增长率的概念应用于道路平纵组合优劣判别,许多以往难以解释的现象(如曲线长度对车速影响,小偏角问题等)得到合理的解释<sup>[1]</sup>。杜志刚博士在其博士论文《面向驾驶员视觉信息加工的行车安全评价模型研究》中对影响驾驶员视觉信息加工的因素(如

色彩、位置、形状、运动频率等)做了深入探讨,并建立了基于信息加工的行车安全评价模型<sup>[2]</sup>。本节在已有研究的基础上,对视觉信息模型及量化表达式做了新的探讨,建立了曲线路段驾驶员视觉信息模型,并将其应用到曲线段车辆加速度研究之中,为分析评价曲线路段车辆行驶状态及驾驶员驾驶行为提供了新的思路和方法。

4.3.1 线形特征在驾驶员视觉中的反映

当车辆在平直的道路上行驶时,道路标线在驾驶员的视野里表现为由灭点展开的放射状射线,如图 4.11 所示。这是驾驶员最容易识别的最简单的形状,驾驶员对其它形状的认识都是基于对该形状的比较而获知的。因此,我们可以把这一种状态定义为基准状态。基准状态下,道路边线上各点在透视图上都沿这放射线方向运动,而在垂直放射线方向则没有变化,而这时,我们不会感到太多的危险,不必改变方向盘的转向。图 4.12 是半径为 65 米的曲线与直线透视图比较,通过当前曲线的透视图与基准状态的透视图之间的比较,我们可以获知曲线形状表征量,从而改变方向盘的转向,使车辆行驶轨迹满足线形要求。



图 4.11 直线路段透视图

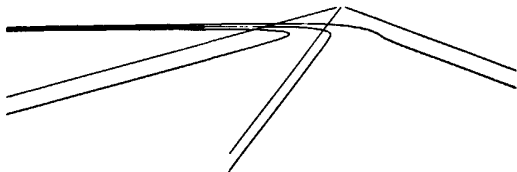


图 4.12 直线和曲线透视图比较

4.3.2 驾驶员注视范围的确定

正常人处于静止状态时的视野分布如图 4.13 所示。在心理学上,将黄斑下陷区张角  $5^{\circ}$  作为最佳视角,黄斑张角  $8^{\circ}$  作为最大视角(水平方向最大角为  $15^{\circ}$ ,竖向角度为  $8^{\circ}$ ,这里取小值),黄斑中央凹张角  $1.33^{\circ}$  作为最小视角。但是其值均是对室内静止视认过程中得出,对于高速运行车辆中,则由于驾驶员视野变小,视线前移,因此最佳视角将会有所下降。

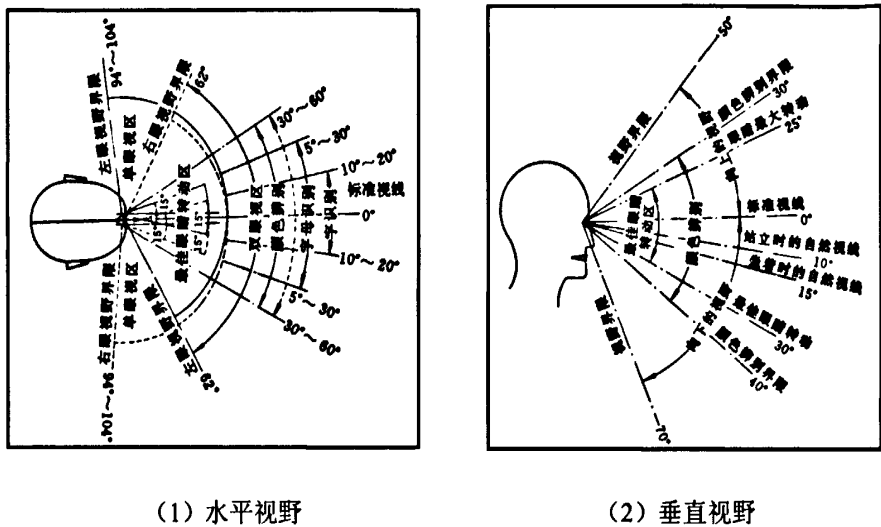


图 4.13 正常人静止时的水平视野和垂直视野

驾驶员在弯道上行驶时，面临着跟踪轨道和避开前方可能出现的障碍物两个任务。从跟踪轨道的角度看，要想获得精准的轨迹跟踪，驾驶员的前视时间应该短一些，但这将加重驾驶员的负担。而从驾驶的舒适性和处理前方突发事件的角度看，驾驶员又希望能看到更远的地方。因此，道路线形在驾驶员的视窗里形成一个视觉敏感区域，这里称为注视范围。如图 4.14 所示，注视范围可包括前注视区域和后注视区域，后注视区域主要用于轨迹跟踪，前注视区域主要用于前方道路条件预判断。

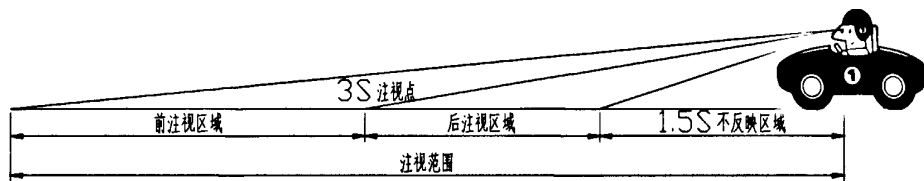


图 4.14 注视范围示意图

在进行缓和曲线设计时，为了不使车辆在换恶化曲线上的行驶时间过短而使驾驶员操作过于匆忙，一般认为车辆在缓和曲线上的行驶时间至少应 3s，同时，《公路设计规范》中也采用 3s 时间来规定最小圆曲线长度，对隧道进出口线形的连续性也作了如此规定。加拿大 Ryerson 大学的 Easa 教授等人对平纵线形

组合下驾驶员的视觉需求（Visual Demand）的研究结果也表明，驾驶员的视觉需求时间间隔一般在 3s 左右<sup>[3][4]</sup>。因此，可以将 3s 时间认为是驾驶员正常行驶状态下的驾驶操作适应时间。本节把 3s 的行程作为驾驶员在弯道上的视觉最敏感位置。同时，根据动视觉原理，一个有意义的知觉时间约为 1.5 秒，因此，在小于 1.5 秒距离的道路信息应作为无效信息。

对于驾驶员注视范围远端的取值，国外有过相关研究，见表 2.4 所示。但该研究成果是针对直线路段得到的，曲线上由于视觉受限，注视范围往往达不到直线路段的注视范围，因此，需要对曲线上驾驶员注视远端进行确定。由于曲线段道路设计时往往是以停车视距作为视距控制。因此，驾驶员的视距最小值应大于等于停车视距。考虑一般性，取 1.2 倍的停车视距作为驾驶员远端注视点。根据停车视距确定的注视点（远端点）如表 4.1 所示。

表 4.1 根据停车视距确定的注视点

车速(km/h)	20	30	40	50	60	70
车速(m/s)	5.55	8.33	11.11	13.89	16.67	19.44
停车视距(m)	18.72	27.40	39.03	51.66	68.443	84.72
注视点取值	22.45	32.88	46.83	61.99	82.13	101.66

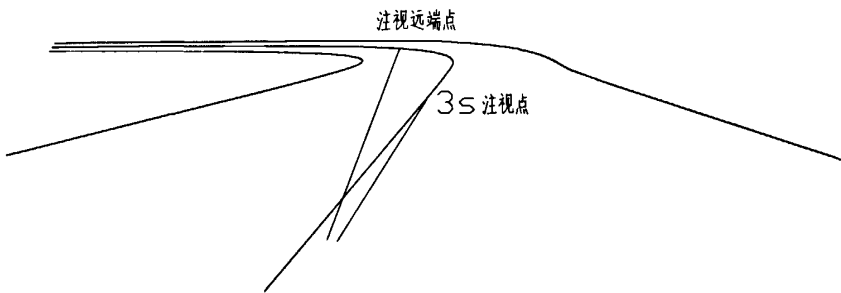


图 4.15 曲线上视点分布

4.3.3 道路信息量化表达

驾驶员行车时一般以道路中线为行车参考线，通过比较曲线段中线偏离直线的程度，获得对曲线弯曲程度的认识和判断，并采取相应的转向减速操作。

为了得到简便有效的表达式，在考虑将道路信息量化的过程中，主要考虑对视觉信息影响较大的道路中线特征，而其他诸如路面宽度、道路交通标志、照度等因素则不考虑在内。

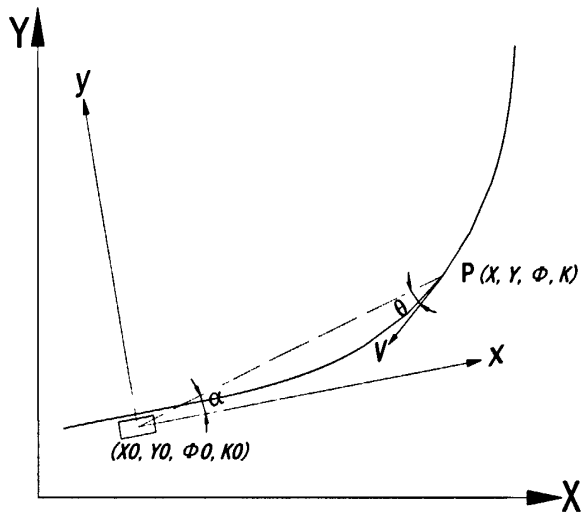


图 4.16 考虑坐标变化的驾驶员预瞄模型

如图 4.16 所示为考虑坐标变化的驾驶员预瞄模型。假设车辆行驶在半径为  $R$  的曲线上，车辆行驶速度为  $\vec{V}$ ，在  $t$  时刻，驾驶员注视点位于曲线的  $P$  点。则对于驾驶员自身感受而言，会觉得注视点  $P$  点正以  $\vec{V}_p$  的速度 ( $|\vec{V}| = |\vec{V}_p|$ ) 迎面朝自己而来。为此，建立以  $t$  时刻车辆所在位置为原点的相对坐标系，则可以将车辆的行驶速度转换为道路中线上各点相对于驾驶员的速度，从而得到信息的量化表达。

驾驶员对前方物体（车辆，路面障碍物等）相对距离和速度的判断可以用驾驶员视角大小和视角变化率表示。注视目标的成像视角越大，则驾驶员感知物体距离自己越近，反之越远；同样的，若注视目标视角变化率越大，驾驶员感知物体相对运动速度变化越快，反之则越小。下面从视角变化的角度提出驾驶员视觉信息的量化表达。



积分范围为驾驶员的注视范围，即积分下限为 1.5s 行车距离，积分上线为 1.2 倍停车视距。

$I_{HVA}$  可以理解为单位时间驾驶员注视范围内视平面视角变化量，单位为弧度·米/秒 ( $rad \cdot m/s$ )。车辆在直线路段行驶时， $I_{HVA}$  恒为零，在曲线路段行驶时，曲率越大， $I_{HVA}$  越大，因此， $I_{HVA}$  实际也反映了曲线偏离直线的程度。

图 4.18 所示为驾驶员垂直视野信息量变化示意图。同理可得到：

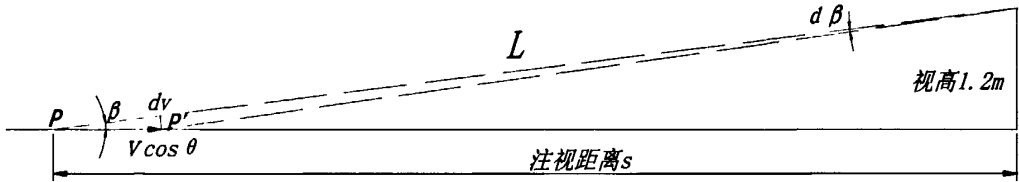


图 4.18 驾驶员垂直视野信息量变化

$$d\beta = \frac{V \cos \theta \sin \beta dt}{L} = \frac{V \cos \theta \sin \beta}{L} \cdot \frac{ds}{V} = \frac{\cos \theta \sin \beta ds}{L} \quad (4-5)$$

式中， $L$  为驾驶员眼睛到注视点的空间距离 (m)， $\theta$  为驾驶员视线与 P 点切线的水平夹角 (rad)， $\beta$  为驾驶员视线与 P 点的垂直夹角 (rad)，对  $d\beta$  进行积分，则驾驶员垂直视角变化量  $I_{VVA}$  (Vertical Visual Angle) 为：

$$I_{VVA} = \int \frac{\cos \theta \sin \beta}{L} ds \quad (4-6)$$

$I_{VVA}$  可以理解为单位时间驾驶员注视范围内垂直视角变化量，单位为弧度·米/秒 ( $rad \cdot m/s$ )。车辆在直线上行驶时， $I_{VVA}$  的值与车辆的车速有关。在曲线路段行驶时， $I_{VVA}$  的与曲线曲率及车辆速度有关，相比  $I_{HVA}$  的取值，其值较小。

构造函数  $I_{VA}$ ，以量化驾驶员的视觉信息，得到基于驾驶员注视范围内视角变化的视觉信息计算表达式如下：

$$I_{VA} = \sqrt{I_{HAV}^2 + I_{VVA}^2} = \sqrt{\left( \int \frac{\sin \theta}{L} ds \right)^2 + \left( \int \frac{\cos \theta \sin \beta}{L} ds \right)^2} \quad (4-7)$$

式中： $\theta$  — 驾驶员视线与注视点 P 点切线的水平夹角 (rad)



$\beta$  —驾驶员视线与注视点 P 点的垂直夹角 (rad)

$L$  —驾驶员眼睛位置到注视点的空间距离

具体计算时，道路模型采用 SK (S 为里程，K 为曲率) 模型，通过该模型，可以方便地确定该点的平面位置 (x 和 y 坐标) 和方位角，从而得到注视范围内没一点的  $\theta$ 、 $\beta$ 、 $L$  值。

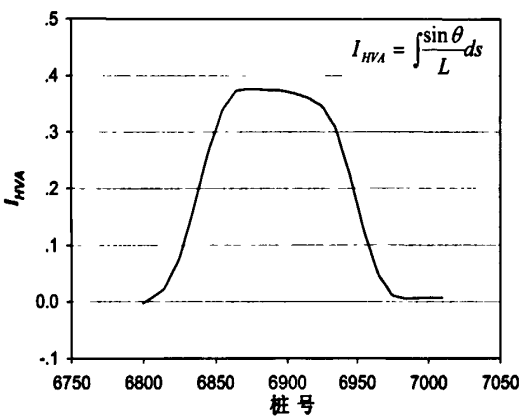


图 4.19  $I_{HVA}$  沿桩号变化情况

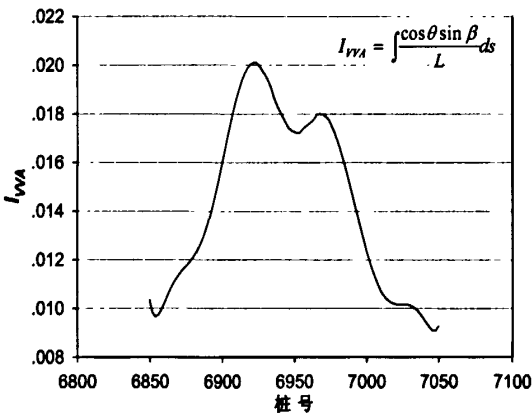


图 4.20  $I_{VVA}$  沿桩号变化情况

图 4.19、图 4.20 所示为车辆以 40km/h 的速度通过半径为 40m 曲线时驾驶员视觉信息变化情况。分析发现，水平视觉信息变化率  $I_{HVA}$  呈现较好的规律性，其变化规律正好与加速度变化规律相反。而垂直视觉信息变化率  $I_{VVA}$  相对较小，所以对驾驶员视觉信息的影响程度也较小。

图 4.21 所示为车辆以 40km/h 的速度通过半径为 40m 曲线时驾驶员总的视觉信息量 ( $I_{VA}$ ) 在曲线上的变化图，它综合反映水平视觉信息和垂直视觉信息的变化情况，其变化趋势类似于水平信息变化率的变化趋势，可以将其划分为 3 个阶段，上升阶段、稳定阶段、下降阶段，这 3 个阶段分别对应于前述加速度变化 3 阶段模型：预减速阶段、减速阶段、加速阶段。因此，可利用驾驶员视觉信息模型解释车辆在曲线路段的加速度变化特征。

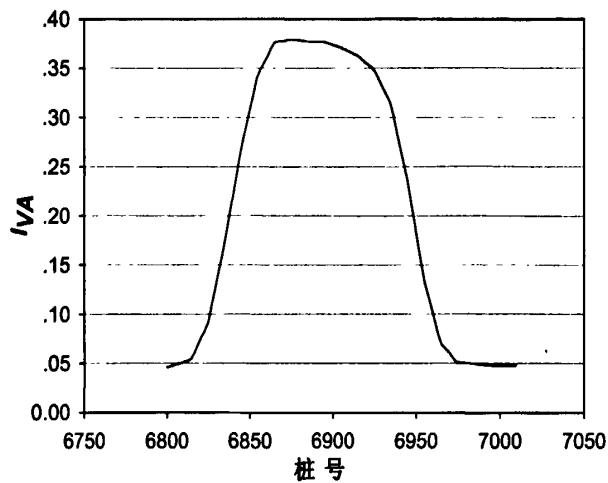


图 4.21  $I/A$  沿桩号变化情况

根据视觉认知理论的基本观点，观察者认知事物的能力是一定的，即观察者只能以一定的速率接收外界信息并对其进行整理加工，做出合理的判断和行为。在这种接收速率下，观察者能够快速有效的进行信息加工处理。当观察者接收信息的速率过快，信息量过多，观察者的信息处理水平就会下降，对一些重要信息来不及加工并做出反应。

对驾驶员而言，随着曲线距离的接近，其接收的视觉信息会逐渐增多，视觉负荷对驾驶员的影响逐渐增大，加上受到曲线段横向力负荷的影响，如果不降低速度，则会因视觉信息接收过快、受横向力负荷过大而产生不适的感觉，甚至影响到车辆的正常行驶，因此，驾驶员通常会采取措施以降低车速。相反的，当车辆驶离曲线时，驾驶员接收的视觉信息量逐渐减小，同时横向力负荷也逐渐减小，由于此时车速一般较低，驾驶员会采取加速操作以驶入前方直线路段。

4.3.4 视觉刺激修正系数

对驾驶员的注视范围的分析得知，驾驶员对注视范围内各点刺激的反应是不同的，也就是说，注视范围内各点的信息量在驾驶员视觉信息形成的过程中所占的比重是不同的，因此，需要确定各点信息量的权重比例。

对于视野里的目标物体，当视角太大时，则被驾驶员作为背景，不能引起

强烈视觉心理反映；当视角太小，则不会引起太大的刺激。所以，存在一个最佳视角，在此范围内的目标物体对驾驶员的刺激最大。

由此，可以考虑取 3s 注视点位置为驾驶员最敏感位置，并假定视觉刺激反应修正系数与视角成高斯分布，如图 4.22 所示，即

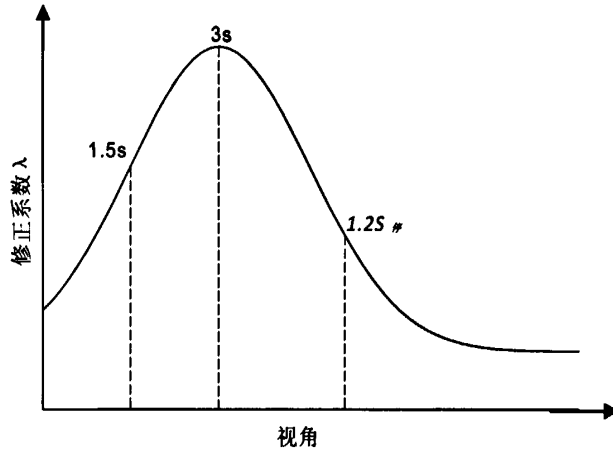


图 4.22 视觉刺激修正系数高斯分布

$$\lambda = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4-8)$$

式中， $\mu$  为 3s 处的视角大小，样本方差  $\sigma^2$  根据极大似然估计确定，即：

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \quad (4-9)$$

视角考虑水平视角与垂视角，整理得到视角修正系数表达式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_H = \frac{1}{\sigma_H\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X_i - \mu_H)^2}{2\sigma_H^2}\right) \\ \lambda_V = \frac{1}{\sigma_V\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(Y_i - \mu_V)^2}{2\sigma_V^2}\right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \sigma_H^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_H)^2 \\ \sigma_V^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_V)^2 \end{array} \quad (4-10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_H = \frac{1}{\sigma_H\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X_i - \mu_H)^2}{2\sigma_H^2}\right) \\ \lambda_V = \frac{1}{\sigma_V\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(Y_i - \mu_V)^2}{2\sigma_V^2}\right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \sigma_H^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_H)^2 \\ \sigma_V^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_V)^2 \end{array} \quad (4-11)$$

最终得到修正后得到的基于驾驶员注释范围内视角变化的觉信息量计算表达式为：

$$I_{VArefine} = \sqrt{\left(\int \lambda_H \frac{\sin \theta}{L} ds\right)^2 + \left(\int \lambda_V \frac{\cos \theta \sin \beta}{L} ds\right)^2} \quad (4-12)$$

式中：

$I_{VArefine}$ — 修正后的驾驶员视觉信息量 (rad)，意为单位时间驾驶员注释范围内驾驶员视角变化量；

$\lambda_H$ — 水平视角修正系数，计算方法见式 (4-10)，无量纲；

$\lambda_V$ — 垂直视角修正系数，计算方法见式 (4-11)，无量纲；

$\theta$ — 驾驶员视线与注视点 P 点切线的水平夹角 (rad)；

$\beta$ — 驾驶员视线与注视点 P 点的垂直夹角 (rad)；

$L$ — 驾驶员眼睛位置到注视点的空间距离 (m)；

图 4.23 所示为修正后驾驶员视觉信息沿桩号变化图(R=40m)。同修正前的  $I_{VA}$  相比，其变化规律仍然相同，只是由于修正系数  $\lambda$  的存在，其值的大小有所减小，但这并不影响对加速度的分析。

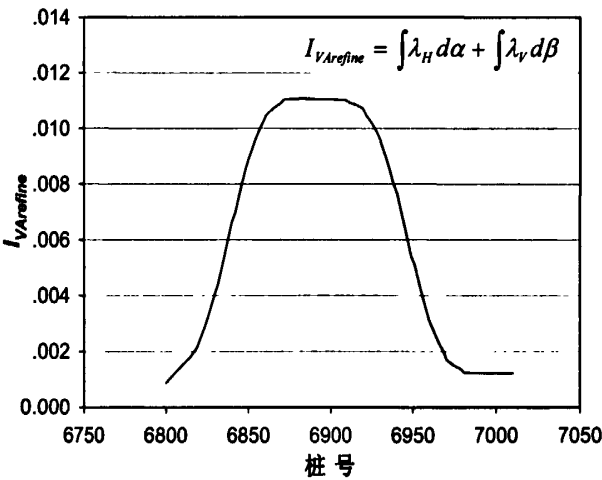


图 4.23  $I_{VArefine}$  沿桩号变化图

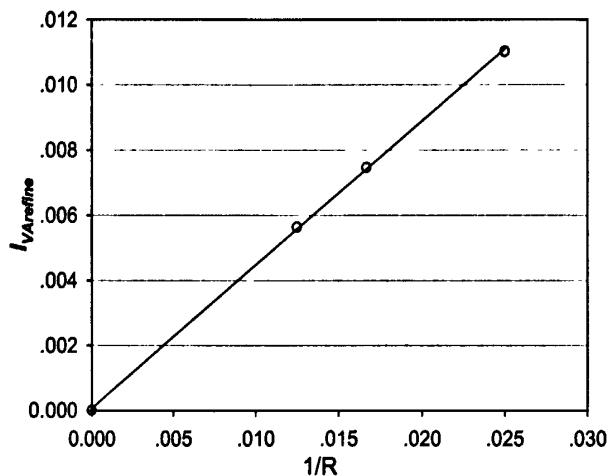


图 4.24  $I_{VArefine}$  随曲率变化图

图 4.24 所示为车辆以正常速度通过曲线时,驾驶员视觉信息量  $I_{VA}$ (最大值) 随曲线曲率的变化情况。一般的,视觉信息与曲线曲率成线性关系,即曲线曲率越大,驾驶员的视觉信息量越大。

4.4 基于视觉信息的纵向加速度模型

将得到的曲线段驾驶员视觉信息模型应用到车辆加速度分析中,得到基于驾驶员视觉信息的加速度变化模型。下面对不同阶段的加速度特征进行具体分析。

4.4.1 预减速阶段

根据减速特征,选取减速度均值、减速度变化率作为研究对象。减速度均值可以衡量在预减速阶段减速度的平均大小;减速度变化率表征了减速度的变化快慢,在物理学方面,加速度变化率有急动、猛推等含义,在非惯性参考系中(例如加速运动的车辆),加速度变化率越大,则乘客会因为难以适应而失去平衡,因此对加速度变化率的分析具有现实意义。

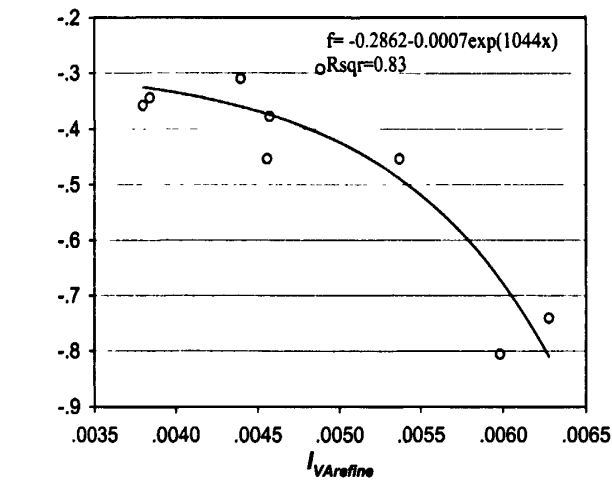


图 4.25 预减速阶段减速度均值—驾驶员视觉信息

图 4.25 所示为小半径曲线上 ( $R=40m$ ,  $R=60m$ ,  $R=80m$ ), 预减速阶段车辆减速度均值与驾驶员视觉信息的拟合关系。实验结果表明减速度均值与驾驶员视觉信息有明显相关性, 随着驾驶员接收的视觉信息的增大, 减速度均值呈现递减规律。

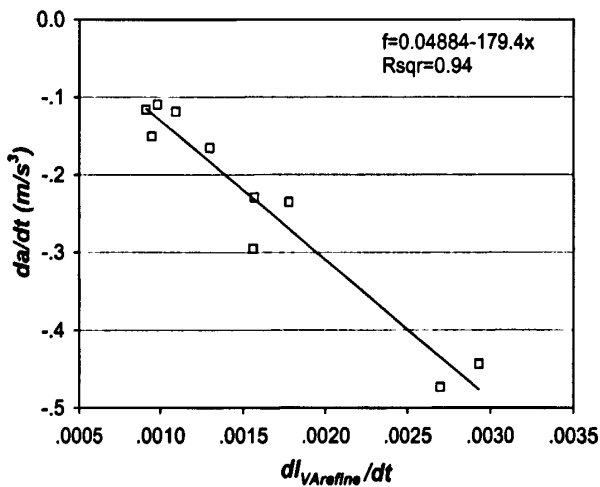


图 4.26 加速度变化率---视觉信息变化率

图 4.26 所示为预减速阶段车辆加速度变化率 ( $\text{m/s}^3$ ) 随驾驶员视觉信息变化率的变化情况, 对数据进行拟合, 发现二者之间存在线性递减规律, 即驾驶员视觉信息变化率越快, 车辆减速度值变化率越大。

以上研究表明, 将视觉信息模型应用到预减速阶段加速度分析中, 可以很好的对加速度的变化特征进行说明。

4.4.2 减速阶段

将视觉模型应用到减速阶段减速度分析中, 得到如图 4.27 所示的减速阶段减速度均值随视觉信息变化关系。由于数据离散程度较大, 拟合结果不能很好的对加速度特征进行说明。分析原因, 一方面, 由于驾驶适应性的原因, 曲线弯曲程度对驾驶员视觉信息的影响逐渐减弱, 由此对驾驶员造成的心理负荷和视觉冲击影响逐渐减小。另一方面, 受到横向力的作用, 驾驶员承担较大的横向负荷, 由此对驾驶员的操作产生一定程度的影响, 其影响的程度随着车辆速度的变化和曲线曲率的变化发生改变, 一般而言, 车辆速度越快, 曲率半径越大, 这种影响越加明显。

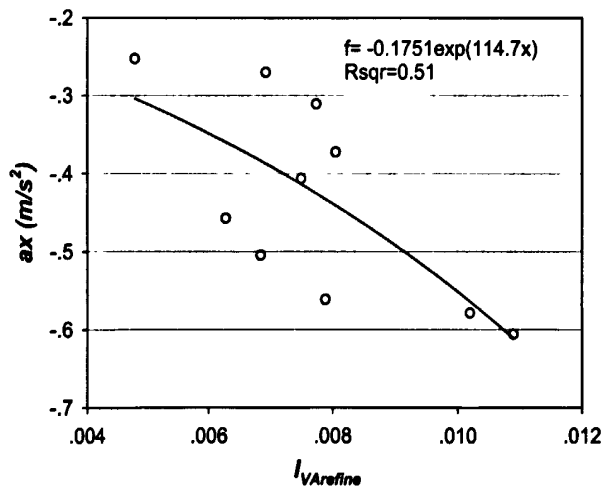


图 4.27 减速度均值---驾驶员视觉信息

基于上述分析, 单纯从视觉信息变化解释减速阶段减速度变化特征, 将存在一定缺陷, 需要考虑横向荷载对驾驶行为的影响, 这将在下一节中进行专题讨论。

4.4.3 加速阶段

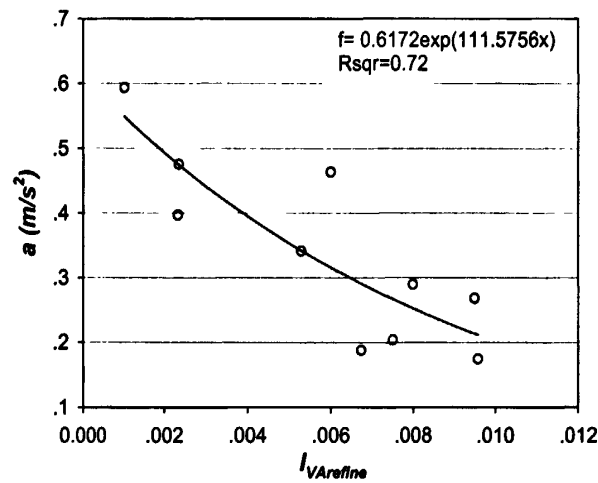


图 4.28 加速阶段加速度均值---驾驶员视觉信息

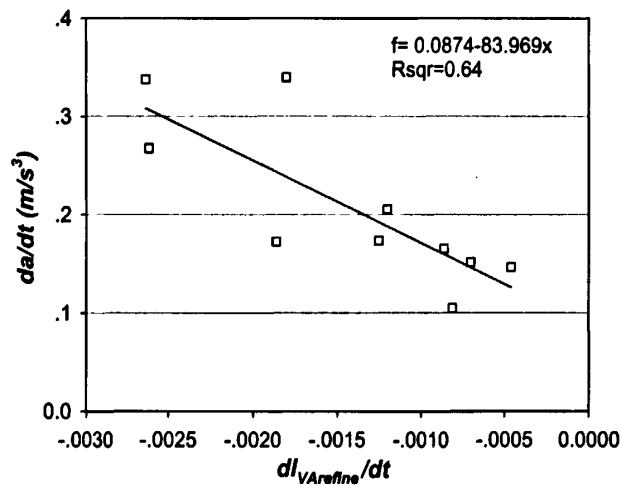


图 4.29 加速阶段加速度变化率—驾驶员视觉信息变化率

加速阶段，由于驾驶员视觉信息呈现递减规律，视觉信息逐渐接近直线段行驶的视觉信息，驾驶员视觉负荷减小，车辆加速行驶。图 4.28 所示为加速阶段加速度均值随驾驶员视觉信息变化关系。从图中发现，随着驾驶员视觉信息



的增大，车辆的加速度均值呈现递减规律。对其可作如下解释：视觉信息量增加，则表明曲线对驾驶员的影响程度仍然明显，受其影响，加速度值相应较小。视觉信息量减少，则曲线对驾驶员影响程度减弱，车辆前方的直线路段特征影响成都增强，加速度相应较大。

图 4.29 所示为加速阶段加速度变化率随驾驶员视觉信息变化关系。由于车辆驶出曲线阶段视觉信息呈递减规律，故横坐标（视觉信息变化率）采用负值。从图中发现，随着驾驶员视觉信息变化率的增大（靠近横坐标左端），车辆加速度变化率呈现递增规律。对其可作如下解释：视觉信息变化率越大，表明线形特征过渡越快，也即是直线特征越明显，车辆加速度越大。

4.5 横向力作用对纵向加速度的影响

由于曲率的存在，车辆在曲线上行驶时受到横向力作用。横向力作用的大小与车辆的速度、曲线曲率相关。横向力作用在汽车上，使车辆产生横向外移的变化趋势，为了保证行驶轨迹，驾驶员必须不断调整方向盘转角，同时控制车速，才能安全通过曲线。同时，横向力作用在驾驶员身体上，将造成驾驶员额外的生理负担，产生诸如心率加快、血压升高等一系列不良生理反应<sup>[5]</sup>，如表 4.2 所示，若横向力过大，将严重危害曲线行车安全。

表 4.2 横向力系数  $\mu$  与驾驶员心率血压变动对应表

$\mu$ 值	心率增加数/（次·min <sup>-1</sup> ）	最高血压增加数/kPa
<0.10	3~13	0.82~3.68
0.1~0.15	4~18	1.40~5.10
0.15~0.2	7~21	1.35~5.43
0.2~0.35	9~22	2.67~6.87
0.35~0.4	15~25	3.66~7.27
>0.40	16~28	4.84~8.37

注：不同  $\mu$  值下乘客自身感受：  
 $\mu < 0.10$  不感到有曲线存在，很平稳；  
 $\mu = 0.15$  稍感到有曲线存在，尚平稳；  
 $\mu = 0.20$  已感到有曲线存在，稍感不平稳；  
 $\mu = 0.35$  感到有曲线存在，不稳定；  
 $\mu > 0.40$  非常不稳定，有倾车的危险感。

用于表征横向力作用大小的指标，一般有横向加速度 ( $\text{m/s}^2$ ) 和横向力系数 (无量纲)。在工程设计中，一般使用横向力系数表征横向力大小。因此，本节选取横向力系数为衡量横向力作用的指标。

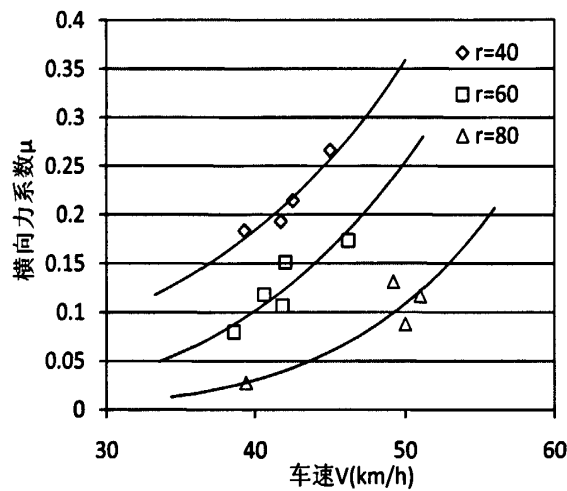


图 4.30 横向力系数—车速

对于驾驶员进入和驶入曲线的阶段，视觉信息模型能较好的对加速度的变化特征进行说明。一方面的原因在于这两个阶段中横向力的作用并不明显。而在圆曲线部分，也就是减速阶段上，仅用视觉信息模型很难说明在该阶段加速度的变化特征。必须考虑到横向力系数对加速度的影响，图 4.30 所示为实验得到的不同半径曲线上横向力系数随速度的变化关系。

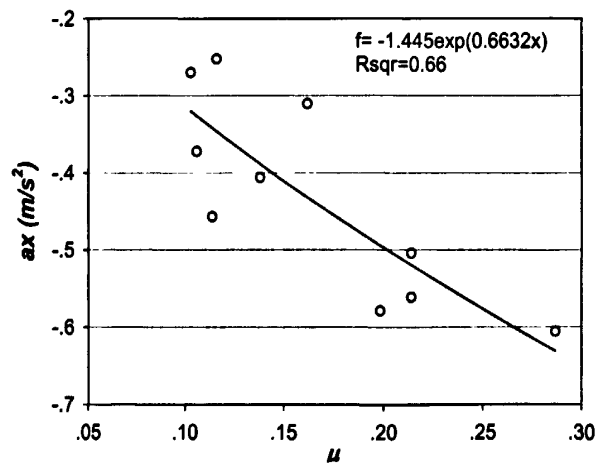


图 4.31 减速度均值—横向力系数

建立减速度均值与横向力系数的关系,如图 4.31 所示,随着横向力系数的增大,车辆的减速度值逐渐增大。横向力过大,行驶安全性越低,驾驶员生理负担和心理压力也就越大,因此,驾驶员需要降低车速,是保证横向力在其自身适应的范围之内。一般的,曲线段上横向力系数不宜大于 0.2,对应于图中所示加速度值为 $-0.5\sim-0.6\text{m/s}^2$ 。

考虑驾驶员视觉信息和横向荷载影响,利用最佳二乘法对数据进行拟合,得到减速阶段,考虑驾驶员视觉信息和横向负荷的减速度计算表达式如下:

$$a = -1.435e^u + 1.254e^{lvA} \quad (4-13)$$

$$r^2 = 0.974$$

从判定系数  $r^2$  看,拟合值与实际测量值之间相关度非常高,可以认为减速度均值是驾驶员视觉信息与横向荷载的函数,并且他们之间可表示为指数关系,需要注意的是,受样本量的影响,上述公式仅表明了加速度与驾驶员视觉信息和横向负荷的关系,对其仍需要进一步的深入研究。

## 4.6 本章小结

根据加速度变化特征,提出了纵向加速度 3 阶段变化模型,即预减速阶段、减速阶段、加速度阶段的模型。对每个阶段的表征意义及加速度的基本特征做了分析说明。研究显示:预减速阶段车辆减速度均值在 $-0.2\sim-0.8\text{m/s}^2$ 之间变动,减速阶段减速度均值在 $-0.2\sim-0.6\text{m/s}^2$ 之间变动,减速度均值(绝对值)随车速的增大而增大;加速阶段,车辆加速度均值在 $0.2\sim0.6\text{m/s}^2$ 之间变动,随着加速阶段车速的增大,加速度均值随车速的增大而减小。

单纯的从线形特征或者车辆行驶状态等方面研究车辆的加速度,很难对不同阶段的纵向加速度变化特征进行解释说明。本章在已有研究成果的基础上,以驾驶行为理论及视觉认知理论为基础,提出了基于驾驶员注视范围内视角变化的视觉信息量表达式,并将其应用到曲线段车辆纵向加速度分析中。提出了基于驾驶员视觉信息变化的车辆纵向加速度模型。并考虑曲线段横向力作用的影响,对减速阶段的车辆加速度模型进行了横向荷载修正。基于视觉信息变化加速度模型可较好地分析车辆的纵向加速度变化规律。

本章提出的基于驾驶员注释范围内视角变化的视觉信息量表达式,提供了一种新的关于驾驶员视觉信息量化的计算方法。对于曲线路段而言,视觉信息量表达式实际反映了实际行车过程中曲线偏离直线的程度在驾驶员眼中的反映,它不仅可以分析说明曲线上车辆的纵向加速度变化特征,同样可以应用到诸如曲线路段车速模型分析、曲线路段道路安全审计、事故黑点辨别等方面。

### 参考文献

- [1] 杨轶. 行车动力学仿真模型研究. 同济大学博士学位论文. 2004, 3
- [2] 杜志刚. 面向驾驶员视觉信息加工的行车安全评价模型研究. 同济大学博士学位论文. 2007, 8
- [3] Easa, S. M. and Ganguly, C. (2005). Evaluation of driver mental workload on complex highway alignments. J. Transp. Eng. 131(8), 583-590.
- [4] Said M. Easa and Wenlong He (2006). Modeling driver visual demand on three-dimensional highway alignment. J. Transp. Eng. 132(5), 357-365
- [5] 潘晓东, 林涛, 杨轶. 驾驶员心率血压与山区公路横向力系数关系[J]. 同济大学学报. 2006.6:748-751
- [6] 高振海, 管欣, 李谦, 郭孔辉. 驾驶员最优预瞄纵向加速度模型[J]. 汽车工程. 2002, 5: 434-437
- [7] 潘兵宏, 赵一飞, 梁孝忠. 动视觉原理在公路线形设计中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 11: 20-24
- [8] 杨轶, 潘晓东, 方守恩, 郭忠印. 基于道路特征信息变化率的公路线形质量评价[J]. 公路交通科技. 2006, 23(10): 1-5.

## 第 5 章 曲线段横向加速度特征及模型

### 5.1 横向加速度变化基本特征

车辆行驶在曲线上产生离心力，离心力的大小与曲线的曲率成正比。汽车由直线进入圆曲线或由圆曲线驶入直线，由于曲率的突变会使乘客有不舒适的感觉。所以在圆曲线和直线之间设置了过渡性的缓和曲线以缓和离心加速度的变化。

从图 5.1 所示为车辆以正常速度行驶在半径为  $R=80\text{m}$  曲线上的横向加速度变化图，从横向加速度  $A_Y$  的变化特征看，在曲线前或曲线后的直线上，车辆横向加速度以零值为中心，呈现上下小幅波动特征，反映出在直线路段车辆不产生横向加速度。在缓和曲线上，由于曲率不再为零，车辆受到横向力作用，其横向加速度呈在前后两个缓和曲线上分别呈现递增/递减变化特征；而在曲线中间的圆曲线部分，由于曲率不变，横向加速度基本保持稳定状态。

由于车辆横向加速度还受车辆行驶速度的影响，在一些速度变化较大的地点，车辆横向加速度有较为明显的波动。

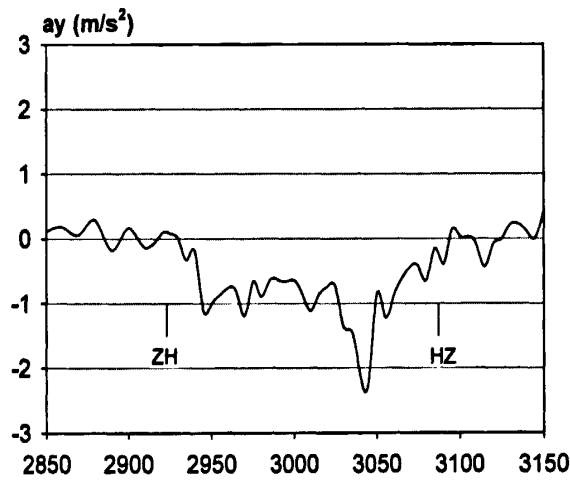


图 5.1 横向加速度

5.2 横向加速度分析

5.2.1 横向加速度变化率

汽车行驶在缓和曲线上，其离心加速度将随着缓和曲线曲率的变化而变化，若变化过快，将会使旅客有不舒适的感觉。从考虑乘客舒适性方面出发，推导得到了缓和曲线的最小长度计算公式：

$$L_{S(min)} = 0.0214 \frac{V^3}{\alpha_s R} \tag{5-1}$$

称  $\alpha_s$  为“缓和系数”，在我国，公路上参考铁路的规定建议  $\alpha_s \leq 0.6 \text{ (m/s}^3\text{)}$ 。

车辆横向加速度由离心加速度和地面提供的向心加速度共同组成，考虑到横向加速度在缓和曲线上的线性变化特征，同时参考离心加速度“缓和系数”的相关概念，对车辆横向加速度变化率 ( $\text{m/s}^3$ ) 作相关研究。

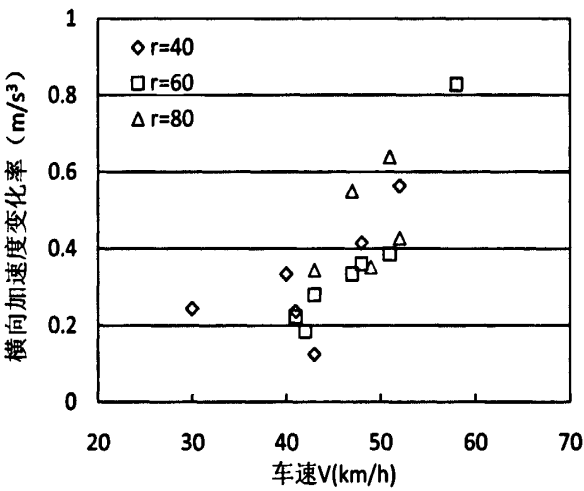


图 5.2 横向加速度变化率---车速

图 5.2 所示为不同半径条件下 ( $R=40\text{m}$ 、 $R=60\text{m}$ 、 $R=80\text{m}$ ) 车辆横向加速度变化率随车速的变化情况。从数据统计结果看，横向加速度变化率的值大部分位于区间  $0.2\text{--}0.6\text{m/s}^3$  之间。对于同一个半径的曲线来讲，随着车辆车速的提高，横向加速度变化率呈递增的变化规律。

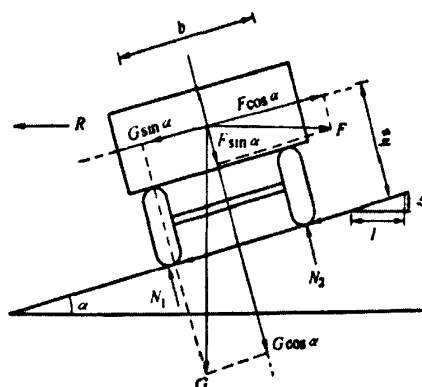


图 5.3 曲线上汽车受力分析

图 5.3 所示为曲线上车辆的受力分析示意图, 对其进行分析, 可得到曲线上车辆的横向加速度表达式为:

$$ay = G \left( \frac{v^2}{g \cdot R} - i_h \right) / m = g \left( \frac{v^2}{g \cdot R} - i_h \right) = \frac{v^2}{R} - i_h g \quad (5-2)$$

横向加速度变化率 LAV (*Lateral Acceleration Variation*)

$$LAV = \frac{\Delta ay}{\Delta T} = \frac{(v_T^2 / R_T - i_T g) - (v_o^2 / R_o - i_o g)}{T} \quad (5-3)$$

式中:  $v_T$  —  $T$  时刻车辆瞬时速度值, 单位 m/s;

$v_o$  —  $O$  时刻车辆瞬时速度值, 单位 m/s;

$R_T$  —  $T$  时刻对应的曲线曲率半径, 单位 m;

$R_o$  —  $O$  时刻对应的曲线曲率半径, 单位 m;

$i_T$  —  $T$  时刻对应的行车道横断面坡度;

$i_o$  —  $O$  时刻对应的行车道横断面坡度;

$g$  — 重力加速度;

$T$  —  $O$  时刻到  $T$  时刻的时间间隔, 单位 s;

由式 (5-3) 得知, 横向加速度变化率与车辆速度  $V$ 、曲率半径  $R$ 、行车道横断面坡度  $i$ 、过渡时间  $T$  等有关, 即可表示为:

$$LAV = f(V, R, i, T) \quad (5-4)$$

车辆从直线进入曲线, 或者由曲线驶入直线, 车辆的横向加速度分别出现递增、递减变化规律, 从驾驶员驾驶适应性讲, 车辆从直线进入曲线时, 车辆横向加速度逐渐增大, 驾驶员受到的横向力作用也逐渐增大, 这增大了驾驶员的驾驶负荷, 对车辆行车安全较为不利, 故选择车辆由直线进入曲线阶段为研究对象, 分析车辆横向加速度变化率特征。

从实验获取数据分析, 横向加速度从零值开始发生变化的点往往在进入缓和曲线的直线上, 直线上的曲率半径  $R$  趋近于无穷大, 当车辆驶入圆曲线部分时, 横向加速度基本保持稳定状态, 在圆曲线部分曲率半径  $R$ 、行车道横断面坡度  $i$  均为定值, 故可对公式 (5-4) 进行简化, 构建函数  $f$  的表达式:

$$f = a \frac{(V_T/3.6)^2}{T \cdot R} + b \frac{\Delta i_h \cdot g}{T} \quad (5-5)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为待定系数;

$\Delta i_h$ —行车道横断面坡度增量,  $\Delta i_h = i_T - i_0$ , 一般直线路段  $i_0 = -0.02$ , 圆曲线部分根据设计资料进行选取。

利用最佳二乘法对数据进行拟合, 确定上式中各项参数值, 得到了车辆横向加速度变化率 LAV 的计算表达式如下:

车辆在曲线内侧行驶时:

$$LAV = 0.294 \frac{(V_T/3.6)^2}{T \cdot R} + 0.424 \frac{\Delta i_h \cdot g}{T} \quad (5-6)$$

$$r^2 = 0.961$$

车辆在曲线外侧行驶时:

$$LAV = 0.083 \frac{(V_T/3.6)^2}{T \cdot R} + 1.096 \frac{\Delta i_h \cdot g}{T} \quad (5-7)$$

$$r^2 = 0.899$$



式 (5-6)、(5-7) 中：

$V_T$  —  $T$  时刻横向加速度稳定状态下车辆瞬时速度值，单位 km/h；

$R$  — 圆曲线曲率半径，单位 m；

$\Delta i_h$  — 行车道横断面坡度增量；

$g$  — 重力加速度；

$T$  — 横向加速度由零增值稳定状态的时间间隔，单位 s；

5.2.2 稳态的横向加速度分析

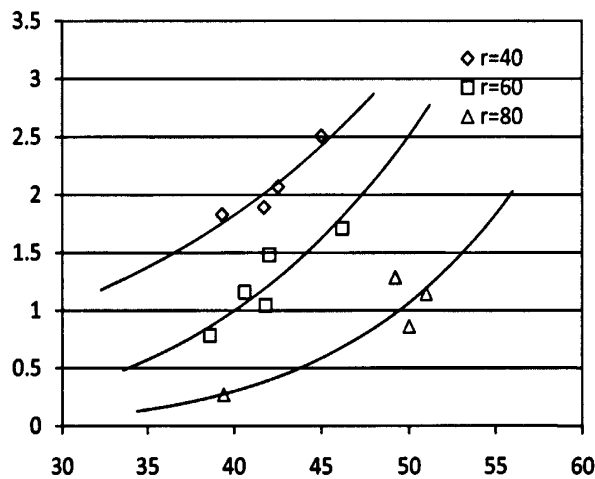


图 5.4 横向加速度---速度

一般的，车辆由缓和曲线进入圆曲线后，由于曲率半径  $R$ 、行车道横断面坡度  $i$  为定值，在一定时间内横向加速度将保持相对稳定的状态。图 5.4 所示为车辆行驶在不同半径圆曲线上，产生的横向加速度随车速变化的情况，从图中可以发现，对于稳态的横向加速度而言，圆曲线半径越小、车辆速度越大，则横向加速度值越大。

式 (5-2) 为车辆横向加速度值的理论计算式，而在实际的行车过程中，由于受到路面不平整度、路面摩擦系数以及行驶过程中风力等影响，实际得到的车辆横向加速度值与理论计算值有所不同，为了区别二者之间的不同，对式 (5-2) 进行了系数修正，引入  $a$ 、 $b$  两个待定系数，以反映真实行车状态下车辆的横向加速度值，如下式所示：

$$LA = a \frac{(V_T/3.6)^2}{R} + bi_h \cdot g \tag{5-8}$$

式中： $a$ 、 $b$  为待定系数；

利用最佳二乘法对实验数据进行拟合，得到车辆横向加速度稳态值的计算表达式如下：

$$LA = 0.821 \frac{(V_T/3.6)^2}{R} - 0.977i_h \cdot g \tag{5-9}$$

$$r^2=0.979$$

式中： $V_T$  一横向加速度稳定状态下车辆瞬时速度值，单位 km/h；

$R$  一圆曲线曲率半径，单位 m；

$i_h$  一圆曲线上行车道横断面超高；

$g$  一重力加速度；

图 5.5、5.6 所示为根据式 5-9 得到的横向加速度的估计值，一般的，随着曲线曲率的变大，车辆横向加速度值变化，横向加速度变化率也将增大，表现为图 5.5 中  $R=40m$  曲线斜率更大。同时，从图中也可发现，若车辆在曲线上行驶速度过低，车辆横向加速度值将变为负值，即表示车辆将发生与离心力方向相反的侧向滑移。

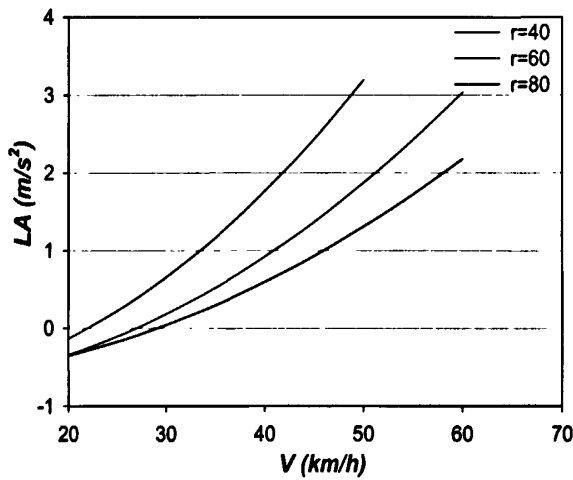


图 5.5 不同速度下横向加速度估计值

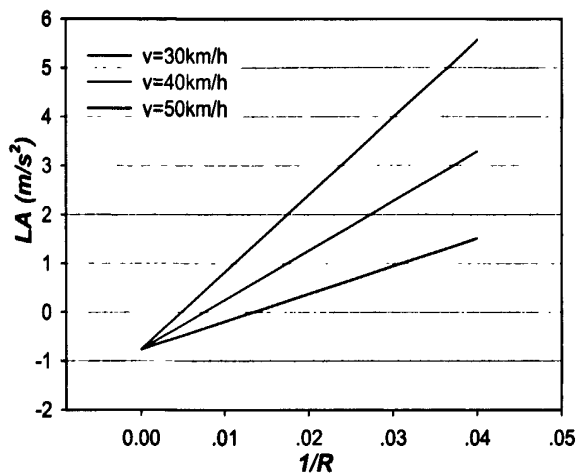


图 5.6 不同曲率横向加速度估计值

5.2.3 横向加速度研究成果应用示例

1) 考虑横向加速度变化率 (LAV) 的缓和曲线最小长度

从图 5.2 统计结果看, 横向加速度变化率的值大部分位于区间  $0.2\sim0.6\text{m/s}^3$  之间, 从乘客舒适性方面考虑, 横向加速度变化率越小越好, 但这会造成缓和曲线长度过长, 工程造价提高等不利影响。在我国, 进行公路设计时, 建议离心加速度变化的缓和系数为  $\alpha_s \leq 0.6\text{m/s}^3$ , 并从乘客舒适性方面出发推导得到了缓和曲线的最小长度计算公式, 见式 (5-1)。参考缓和系数  $\alpha_s$  的取值, 可将横向加速度变化率取为  $0.6\text{m/s}^3$ , 并通过公式推导出缓和曲线最小长度, 与现有计算结果进行比较。

假设缓和曲线长度为  $L_s$ , 车辆以车速  $V$  从直线驶入曲线, 则在缓和曲线上的行驶时间  $T$  可表示为:

$$T = L_s / V \tag{5-10}$$

将式 (5-10) 带入式 (5-6)、(5-7), 则可得到考虑横向加速度变化率的缓和曲线长度  $L_s$  计算式, 如下所示:

$$\begin{cases} \text{曲线内侧: } L_{SN} = 0.0063 \frac{V^3}{R \cdot LAV} + 0.1178 \frac{\Delta i_h \cdot g \cdot V}{LAV} \\ \text{曲线外侧: } L_{SW} = 0.0018 \frac{V^3}{R \cdot LAV} + 0.3044 \frac{\Delta i_h \cdot g \cdot V}{LAV} \end{cases} \quad (5-11)$$

令 LAV(横向加速度变化率) ≤0.6m/s<sup>3</sup>，则可得到考虑横向加速度变化率的缓和曲线最小长度，如表 5.1 所示。

表 5.1 考虑横向加速度变化率的缓和曲线最小长度

<div>速度 半径 m</div>	内侧行驶 $L_{SN}$			外侧行驶 $L_{SW}$			$Max(L_{SN}, L_{SW})$			《规范》值	
	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	60
R=40	21	39	64	25	34	46	25	39	<u>64</u>	35	50
R=60	16	28	45	23	31	41	23	31	45	35	50
R=80	13	22	35	22	30	38	22	30	38	35	50

- 注：1、表中曲线半径取 R=40m、R=60m、R=80m；
- 2、车辆速度取 V=40km/h、V=50km/h、V=60km/h；
- 3、计算曲线超高时，参考线形资料取曲线超高为 0.08，由于直线路段曲线坡度为 0.02，故当车辆在曲线内侧行驶时， $\Delta i_h=0.06$ ，车辆在外侧行驶时， $\Delta i_h=0.10$ ；
- 4、 $Max(L_{SN}, L_{SW})$ 表示取  $L_{SN}$ 、 $L_{SW}$  计算结果中较大的值；
- 5、《公路路线设计规范》中缺少 V=50km/h 下缓和曲线最小长度，故此处只列举了 V=40km/h、V=60km/h 下的设计规范值。

- 从表 5.1 中分析发现：
- 1、对于小半径曲线而言，随着车辆车速增大，则所需缓和曲线长度越大。同时，曲线半径越小，缓和曲线长度增大的程度也就越明显。
  - 2、在车速不变的条件下，随着曲线半径的增大，满足横向加速度变化率的缓和曲线长度越小。
  - 3、与《规范》中规定的缓和曲线最小长度相比，计算得到的缓和曲线长度小于《规范》规定的值，但应该看到，在 R=40m 半径曲线上，当车速增值 V=60km/h

后，满足横向加速度变化率的缓和曲线长度增至 64m，远高于《规范》中规定的 50m。对于山区公路上的这类小半径曲线，在条件允许下，需要适当增加缓和曲线的长度，以保持乘客乘车舒适性以及行车安全性。

2) 基于驾驶员可承受横向负荷的最小曲线半径

图 5.4 所示为不同半径曲线上车辆横向加速度随车速变化图，对横向加速度的统计结果表明，横向加速度的分布范围位于区间 1~2m/s<sup>2</sup> 之间；另有研究资料表明，在山区公路小半径曲线上，横向力系数不宜大于 0.2，换算为横向加速度约为 1.96 m/s<sup>2</sup> (0.2\*9.8=1.96 m/s<sup>2</sup>)。故以 2 m/s<sup>2</sup> 作为驾驶员可承受的横向加速度水平，以此可计算得到曲线半径大小。

由式 (5-9) 可得到半径计算式，如下：

$$R = 0.0633 \frac{V^2}{(LA + 0.977i_h \cdot g)}$$

(5-12)

参考《规范》及相关设计资料，对于山区小半径曲线，取曲线超高*i<sub>h</sub>*=0.08，同时令 *LA*≤2 m/s<sup>2</sup>，可得到基于驾驶员可承受横向负荷的最小曲线半径值，如下表 5.2 所示。

表 5.2 基于驾驶员可承受横向负荷的最小曲线半径

速度 (km/h)	V=30	V=40	V=50	V=60
最小曲线半径 (m)	21	37	57	82
极限半径值 (m)	30	60	—	125

注：1、极限最小半径为《公路路线设计规范》规定值；  
2、《规范》中未对 V=50km/h 下极限最小半径做出规定。

从表 5.2 看，《规范》中规定的各设计车速下的极限最小半径要远大于由式 (5-12) 计算得到的考虑驾驶员可承受横向负荷的最小曲线半径。对于山区公路设计而言，若受山区地理环境的限制，在不能满足《规范》中极限最小半径的条件下，表 5.2 的计算结果为设计人员提供了一种合理可信的设计依据，设计

人员可参考表 5.2 的计算结果，选择相应的最小曲线半径进行设计。

基于驾驶员可承受横向负荷的最小曲线半径的计算结果与基于驾驶员心率血压反应的实验研究中获得的当车辆低速行驶时 ( $V \leq 35\text{km/h}$ ) 时，小于 20m 的曲线增大了驾驶员的心理生理负担的研究结果<sup>[3]</sup>一致，验证了该研究方法的可行性与实验结果的合理性。

5.3 车辆行驶轨迹模型

5.3.1 已有研究成果总结

传统的车辆转弯行驶模型将车辆轨迹视为圆曲线或者弧线，并且认为车辆在曲线段的行驶速度恒定不变。以圆曲线或弧线建立的模型较为简单，为理论分析及工程设计带来了便利。但是实际观测结果表明，车辆在曲线段的转弯行驶轨迹与圆曲线或者弧形曲线存在较大的误差，是一种复杂的高次曲线。

同济大学杨轸博士在其博士论文《行车动力学仿真模型研究》中，提出了任意道路线形下的理想状态单点预瞄最优曲率模型。根据该模型，对不同的道路平面线形的行车安全性进行了分析，得到了两个结论：一、在排除周围环境和交通的干扰下，车辆在进入曲线段总是朝曲线的内侧偏移，而出曲线时又朝外侧偏移。二、车速越高，缓和曲线的曲率变化率越大，其侧向偏移值越大。并得到了实验验证<sup>[1]</sup>。如图 5.7、图 5.8 所示。

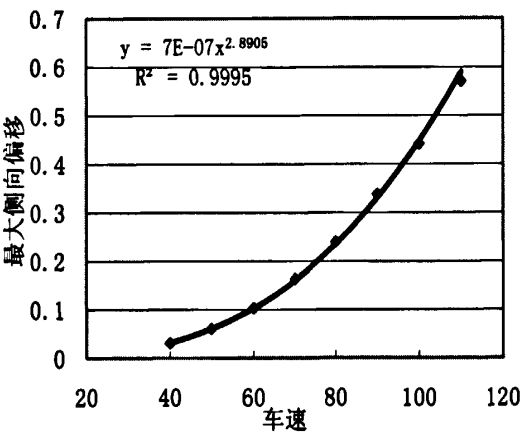


图 5.7 车速与最大侧向位移关系图

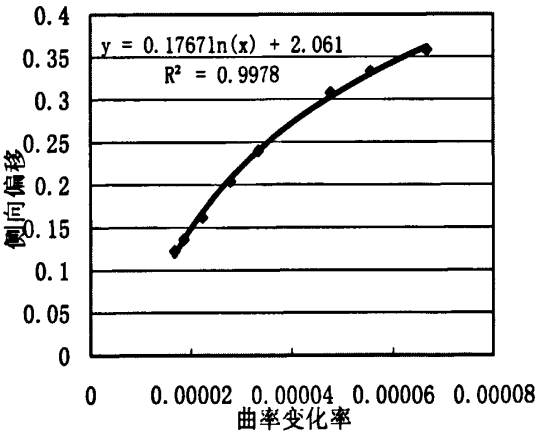


图 5.8 曲率变化率与最大侧向位移关系

注：1、图 5.7 中曲线半径  $R=300\text{m}$ ，缓和曲线长度  $L_s=100\text{m}$ ；

2、图 5.8 中曲线半径  $R=300\text{m}$ ，圆曲线长度  $L=200\text{m}$ ，缓和长度  $L_s$  分别取 50、60、70、100、120、150、180 和 200，车速为  $80\text{km/h}$ 。

上述实验条件是在车辆车速较高、曲线半径较大条件下进行的，由于山区公路曲线半径一般较小，且车速相对较低，上述研究结果不能直接应用到山区公路小半径曲线车辆轨迹位移分析中。

5.3.2 小半径曲线车辆轨迹位移基本特征

在桩号为  $K2+900\sim K3+400$  和  $K6+600\sim K7+100$  的两个路段进行轨迹测量实验，其中包括四个小半径曲线，线形资料见表 5.3 所示。实验以  $20\text{m}$  为间距，测量了车辆中线距离车道边线的距离，供分析使用。

表 5.3 实验路段平曲线要素表

JD 编号	转角	R (m)	ls (m)	L (m)	曲线起止桩号			
					ZH	HY	YH	HZ
4	79/7/40	80	55	165.48	K2+924.72	K2+979.72	K3+035.2	K3+090.2
5	-123/58/55	65	50	190.65	K3+157.82	K3+207.82	K3+298.47	K3+348.47
11	-136/52/20	60	60	203.33	K6+026.67	K6+086.67	K6+170	K6+230
13	-161/10/05	40	30	142.52	K6+842.99	K6+872.99	K6+955.51	K6+985.51

注：编号 13 曲线为事故黑点。

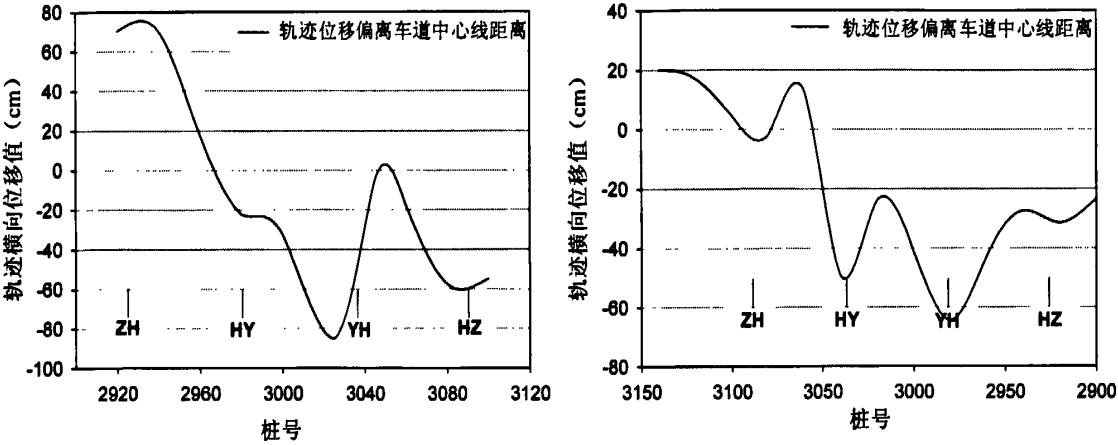


图 5.9 车辆轨迹横向位移偏离车道中心线变化图 ( $R=80m$ )

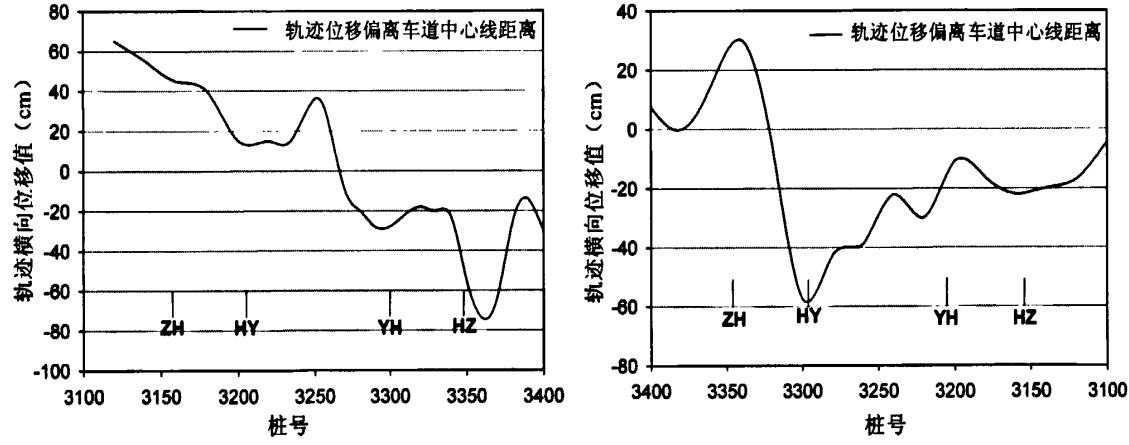


图 5.10 车辆轨迹横向位移偏离车道中心线变化图 ( $R=65m$ )

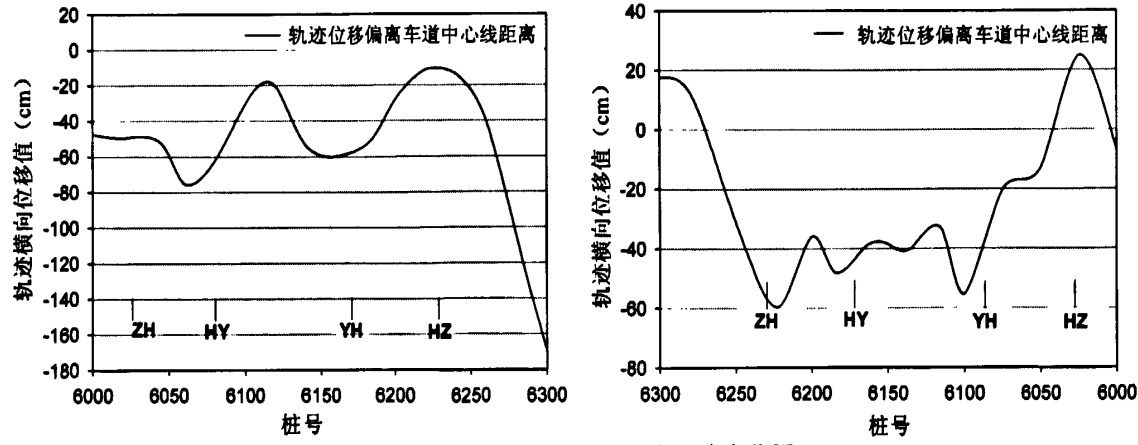


图 5.11 车辆轨迹横向位移偏离车道中心线变化图 ( $R=60m$ )



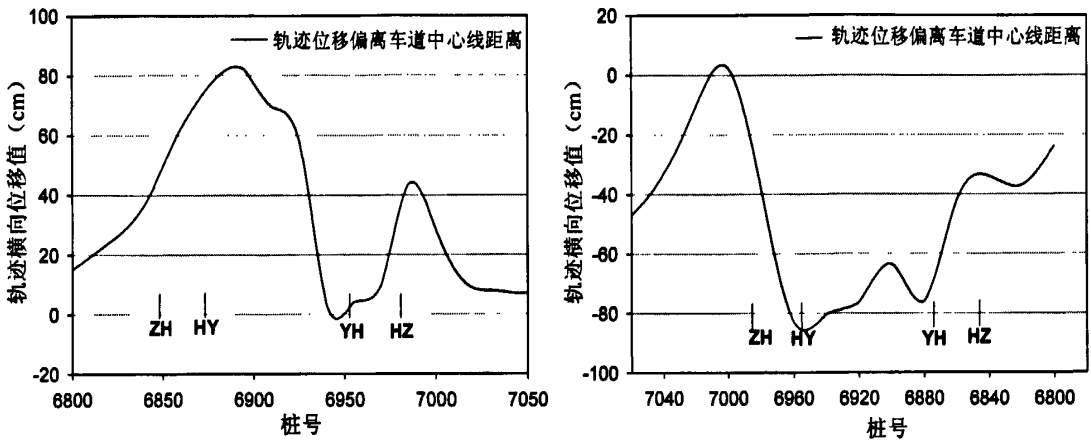


图 5.12 车辆轨迹横向位移偏离车道中心线变化图 ( $R=40m$ )

以车道中心线为基准零线，以车辆行驶轨迹与车道中心线的横向间距为车辆轨迹横向位移。在进行分析时，取车辆向曲线外侧滑移时的横向位移为正值，相反的，车辆向曲线内侧滑移时的横向位移为负值，得到了车辆在实验曲线上轨迹横向位移偏离车道中心线变化图，如图 5.9—图 5.12 所示。图中，纵坐标表示车辆轨迹横向位移值，如其值为零，表示车辆沿车道中心线行驶；值大于零，表示车辆沿曲线外侧方向偏离车道中心线；值小于零，表示车辆沿曲线内侧方向偏离车道中心线。

对车辆轨迹横向位移的分析表明，车辆在小半径曲线上行驶时，其行驶轨迹有如下基本特征：

- 1、行驶过程中，车辆并不是沿着车道的中心线行驶，而是与车道中心线有一定程度的左右偏离；
- 2、从实验数据看，车辆在小半径曲线上行驶时，轨迹横向偏移最大值一般出现在曲线圆曲线的两端，即横向偏移最大值一般在曲线 HY 点和 YH 点附近，从数据统计的结果看，轨迹横向偏移的范围在  $\pm 80cm$  之间；
- 3、根据对轨迹横向偏移值正负方向的规定，当轨迹横向偏移值由正变负，或者当偏移值逐渐减小时，表明车辆向曲线内侧发生横向偏移运动；相反的，如果偏移值由负变正，或者偏移值逐渐变大，表明车辆向曲线外侧发生横向运动。因此，图 5.9—图 5.12 中曲线段上车辆轨迹横向偏移的变化图表明：车辆在进入曲线时发生内向偏移，而在驶出曲线时发生外向偏移，该结论也印证了杨轶博士的研究成果；

5.3.3 小半径曲线车辆轨迹横向偏移模型

车辆轨迹横向偏移与曲线半径  $R$ 、车辆行车速度  $V$ 、道路横断面坡度(超高)  $i$ 、缓和曲线  $L_s$  等因素有关。在曲线路段, 车辆受横向力作用, 产生横向加速度, 根据动力学的知识, 在此加速度作用下车辆将产生相应的位移, 由于横向加速度作用方向朝曲线外侧, 故由横向力作用产生的轨迹横向偏移也是朝曲线外侧的。对于驾驶员来说, 为了抵消这种外向偏移, 需要转动方向盘, 改变车辆行驶角度, 从而维持车辆正常行驶轨迹。因此, 可以用横向加速度表征车辆轨迹横向偏移的程度。由于横向加速度的计算方法包含了诸如曲线半径  $R$ 、车速  $V$ 、横断面坡度(超高)  $i$  等影响因素, 因此以横向加速度为指标可以较为全面的反映问题。

对车辆横向加速度特征的研究表明, 在圆曲线路段, 车辆横向加速度保持在一个相对稳定水平, 考虑一般性, 选择横向加速度相对稳定状态下的车辆横向偏移值为研究对象。

车辆在进入曲线前, 其行驶轨迹并不是沿理想的车道中线行驶的, 而是与车道中线存在一定程度的横向偏移。以车辆在曲线 ZH 点位置的轨迹横向偏移值为基准零值, 并计算相应的轨迹偏移值, 得到了如图 5.13、5.14 所示的轨迹横向偏移—横向加速度变化规律。

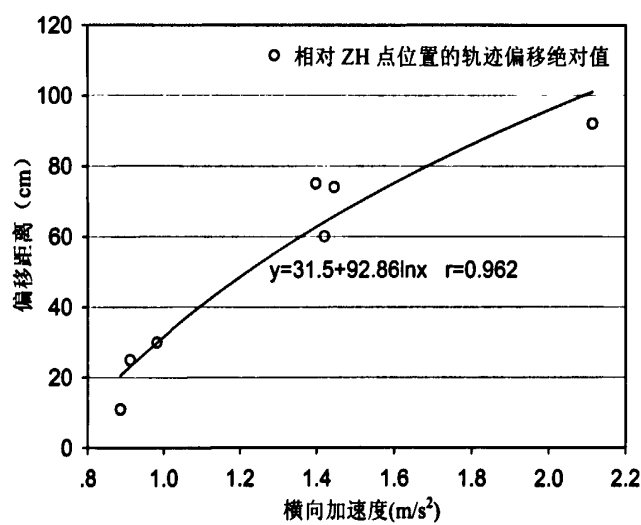


图 5.13 相对 ZH 点位置的轨迹偏移距离—横向加速度

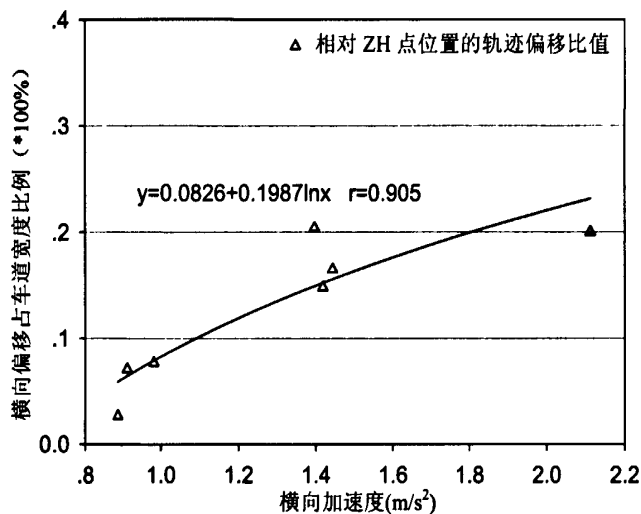


图 5.14 相对 ZH 点的轨迹偏移比例—横向加速度

对车辆轨迹横向偏移值与车辆横向加速度进行拟合，得到了基于横向加速度的曲线段车辆轨迹横向偏移  $TEV$  (Track Excursion Value) 计算公式，如下所示：

$$TEV = 31.5 + 92.86 \ln (LA) \tag{5-13}$$

又因：

$$LA = 0.821 \frac{(V_T/3.6)^2}{R} - 0.977 i_h \cdot g$$

故基于横向加速度的曲线车辆轨迹横向偏移  $TEV$  计算公式可表达为：

$$TEV_{ZH} = 31.5 + 92.86 \ln \left( 0.821 \frac{(V_T/3.6)^2}{R} - 0.977 i_h \cdot g \right) \tag{5-14}$$

式中：  $TEV_{ZH}$  — 相对 ZH 点车辆轨迹的横向偏移距离，单位 cm；

$V$  — 车辆车速，单位 km/h；

$R$  — 曲线半径，单位 m；

$i_h$  — 曲线横向超高；

$g$  — 重力加速度；

在考虑曲线段 ZH 点位置车辆偏移车道中心线位移的基础上，得到了如式（5-14）所示的车辆轨迹横向偏移计算公式，根据式（5-14）可以计算出在不同速度下，不同半径曲线上车辆的横向偏移距离，为曲线段的路面加宽值的确定提供了参考依据，但由于车辆在曲线 ZH 点位置存在一定的横向偏移，式（5-14）不能直接用于曲线路面加宽。

驾驶员在曲线路段行驶时，一般利用车道中线进行视线诱导。图 5-15 所示为车辆在曲线上行驶的轨迹示意图，图中 L 表示车辆轨迹偏移中央分隔线的横向距离。以中央黄色分割线作为基准零线，计算相应的轨迹偏移值，得到了横向加速度和轨迹横向偏移最大值的关系，见图 5.16、5.17 所示。

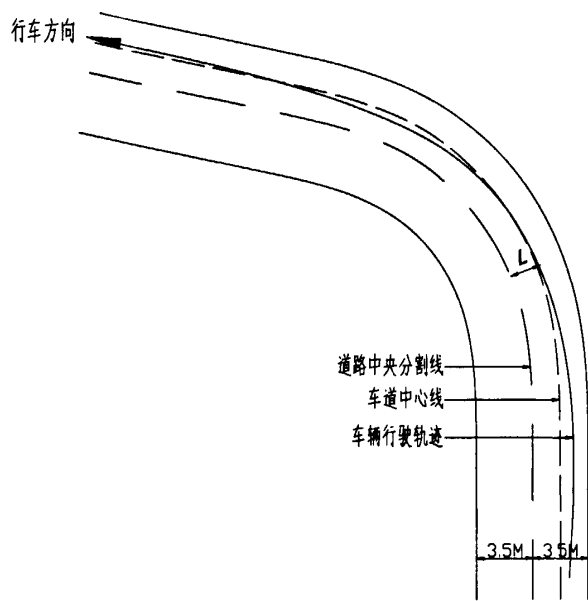


图 5.13 曲线路段车辆行驶轨迹示意图

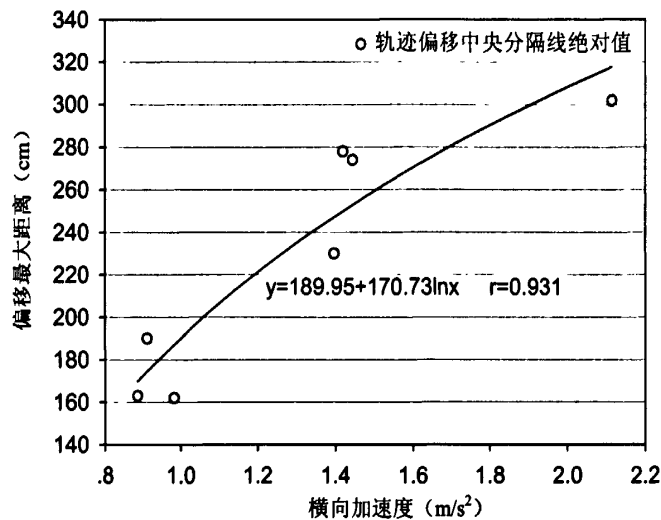


图 5.16 轨迹偏移线（绝对值）—横向加速度

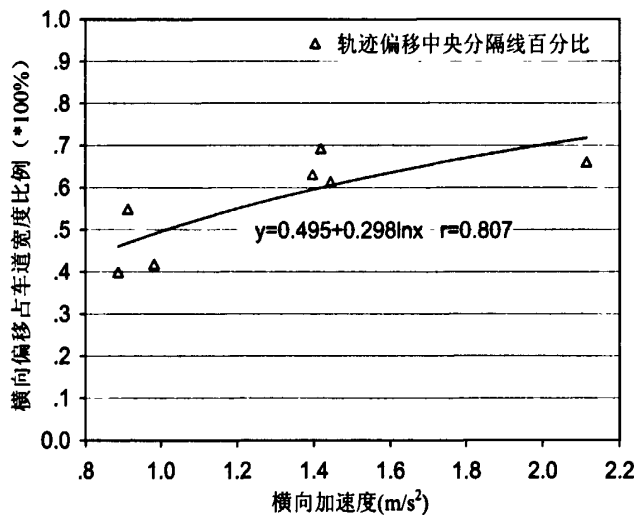


图 5.17 轨迹偏移线（百分比）—横向加速度

一般的，随着横向加速度的增大，车辆偏移道路中央分隔线的距离也就越大。由于道路路幅宽度有限，所以轨迹偏移值的变化程度也会相应的递减。图 5.16 中在横向加速度为  $1.4m/s^2$  时，轨迹偏移可达到 280cm，当横向加速度为  $2.1m/s^2$  时，轨迹偏移可达到 300cm。

根据图 5.16 数据拟合结果，得到了车辆轨迹横向偏移最大值与横向加速度的关系表达式，如下所示：

$$TEV = 189.95 + 170.73 \ln \left( 0.821 \frac{(V_T/3.6)^2}{R} - 0.977 i_h \cdot g \right) \quad (5-15)$$

式中：TEV — 相对中央分隔线的轨迹横向偏移距离，单位 cm；

V — 车辆车速，单位 km/h；

R — 曲线半径，单位 m；

i<sub>h</sub> — 曲线横向超高；

g — 重力加速度；

根据式 (5-15)，可计算得到不同半径曲线上车辆相对中央分隔线的轨迹偏移最大值，由于实验路段横截面车道宽度为 3.5m，故曲线段车道加宽值可由下式确定：

$$\Delta L = TEV - 175 \text{ (cm)} \quad (5-16)$$

计算结果见表 5.4 所示。

表 5.4 轨迹横向偏移值（单位：cm）

	V=40km/h	V=50km/h	V=60km/h	《规范》值
R=40m	112.2	<u>213.2</u>	<u>287.5</u>	200
R=60m	1.3	122.1	<u>204.5</u>	150
R=80m	—	48.0	<u>140.4</u>	120
R=100m	—	16.5	<u>106.2</u>	90

注：1、计算时假定曲线超高为：R≤80m 时 i=0.08，R=100m 时 i=0.06；

2、《规范》加宽值取汽车轴距加前悬 8m 对应加宽值。

《公路路线设计规范》规定二级公路、三级公路、四级公路的圆曲线半径小于或等于 250m 时，应设置加宽。但《规范》并没有针对山区小半径曲线做出详细的规定，从表 5.4 计算的结果看，在车速 V=60km/h 时，计算得到的加宽值大于《规范》规定值。表 5.4 的计算结果可为山区公路小半径曲线车道加宽提供设计依据。

## 5.4 本章小结

在行车实验的基础上,分析了小半径曲线上车辆横向加速度的基本变化特征。通过对曲线段车辆横向受力的分析,得到了车辆横向加速度变化率、横向加速度稳定值的计算公式。根据计算公式得到了考虑横向加速度变化率  $LAV$  的缓和曲线最小长度、基于驾驶员可承受横向负荷的圆曲线最小半径等设计指标。可为山区公路小半径曲线的设计提供参考依据。

针对已有研究的不足,考虑山区公路小半径曲线的特点,分析了车辆行驶轨迹的基本特征。研究表明:对于小半径曲线而言,车辆在进入曲线时发生内向偏移,而在驶出曲线时发生外向偏移。该结论印证了已有的研究成果。

考虑曲线路段车辆受力特征及驾驶员驾驶行为,分析了横向加速度与车辆轨迹横向偏移的相关性,得到了基于横向加速度的轨迹横向偏移计算模型,计算结果可为曲线路面加宽值提供参考依据。

## 参考文献

- [1] 杨轶. 行车动力学仿真模型研究. 同济大学博士学位论文. 2004, 3
- [2] 张雨化主编. 道路勘测设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997
- [3] Pan, X.D, Yamamoto, M, and Goto, J (1996). Studies on the evaluation of the geometrical design of forest roads by driver's physiological response — Heart rate and systolic blood pressure changes as criterion of evaluating geometrical design. Journal of the Japanese Forestry Society, Vol. 78, No. 4, 1996: 404~409

## 第6章 结论与展望

### 6.1 结论

论文对国内外有关车辆加减速控制、驾驶员动态视觉、驾驶行为理论等研究进行了归纳总结,对山区公路多个小半径曲线进行了行车实验,主要得到以下结论:

- 1、根据纵向加速度变化特征,提出了小半径曲线上车辆纵向加速度变化3阶段模型:预减速阶段、减速阶段、加速度阶段模型。对每个阶段的表征意义及加速度的基本变化特征做了分析说明,并对加速度均值,加速时间等特征量做了统计分析。
- 2、在已有成果的基础上,以驾驶行为理论以及视觉认知理论为基础,提出了基于驾驶员注视范围内视角变化的视觉信息量表达式,并应用到纵向加速度分析中,提出了基于驾驶员视觉信息变化的车辆纵向加速度3阶段模型;由于受横向力作用影响,对减速阶段的车辆加速度模型进行了横向荷载修正,提出了基于驾驶员视觉信息变化和横向负荷的车辆纵向加速度模型,视觉信息模型较好的解释了车辆纵向加速度的变化特征。
- 3、分析了小半径曲线上车辆横向加速度变化的基本特征。得到了车辆横向加速度变化率、横向加速度稳定值的计算公式。根据计算公式得到了考虑横向加速度变化率  $LAV$  的缓和曲线最小长度、基于驾驶员可承受横向负荷的圆曲线最小半径等设计指标。可为山区公路小半径曲线的设计提供参考依据。
- 4、在已有研究成果基础上,考虑到山区公路小半径曲线的特点,分析了车辆行驶轨迹的基本特征,印证了已有的研究成果。同时,考虑曲线路段车辆受力特征及驾驶员驾驶行为,分析了横向加速度与车辆轨迹横向偏移的相关性,得到了基于横向加速度的轨迹横向偏移计算模型,计算结果可为曲线路面加宽值提供参考依据。



## 6.2 创新点

- 1、根据加速度变化特征,提出了纵向加速度 3 阶段变化模型,即预减速阶段、减速阶段、加速度阶段的模型。对每个阶段的表征意义及加速度的基本特征做了分析说明。
- 2、提出了基于驾驶员注视范围内视角变化的视觉信息量表达式,提供了一种新的关于驾驶员视觉信息量化的计算方法。对于曲线路段而言,视觉信息量表达式实际反映了实际行车过程中曲线偏离直线的程度在驾驶员眼中的反映。视觉信息量表达式不仅可以分析说明曲线上车辆的纵向加速度变化特征,同样可以应用到诸如曲线路段车速模型分析、曲线路段道路安全审计、事故黑点辨别等方面。
- 3、得到了曲线段的横向加速度变化率和横向加速度稳态值的计算公式。根据计算公式得到了考虑横向加速度变化率  $LAV$  的缓和曲线最小长度、基于驾驶员可承受横向负荷的圆曲线最小半径等设计指标。
- 4、针对山区公路小半径曲线的特点,考虑曲线路段车辆受力特征及驾驶员驾驶行为,分析了横向加速度与车辆轨迹横向偏移的相关性,得到了基于横向加速度的轨迹横向偏移计算模型,计算结果可为曲线路面加宽值提供参考依据。

## 6.3 进一步工作的方向

本文的研究虽然取得了初步的成功,但依然任重道远,尚有许多有待进一步深入进行的研究工作,这里择其要者简要讨论如下:

- 1、由于时间实验关系,通过筛选,实验样本数量较少,且以青年男性驾驶员为主,有条件还需要进行补充实验。
- 2、关于道路交通信息量量化模型基于相关领域研究成果,有一些假定,比如驾驶员注视范围、驾驶员 3s 注视点等,还需要进一步在道路交通实验中验证。
- 3、关于纵向加速度变化 3 阶段模型,对于各阶段的起始位置可作进一步研究。
- 4、可对视觉信息与车辆行驶轨迹的关系做进一步研究。

## 致谢

逾尺的札记和研究纪录凝聚成这么薄薄的一本，高兴和欣慰之余，不禁感慨系之。记得鲁迅在一篇文章里写道：“人类的奋战前行的历史，正如煤的形成，当时用大量的木材，结果却只是一小块”。倘若这一小块有点意义的话，则是我读书生活的最好纪念，也令我对于即将迈入的新生活更加充满信心。

本研究及学位论文是在我的导师潘晓东教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。潘老师严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。从课题的选择到项目的最终完成，潘老师都始终给予我细心的指导和不懈的支持。两年多来，潘老师不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向潘老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

感谢在学校期间方守恩教授、郭忠印教授、陈雨人副教授、张兰芳老师对我的无私帮助和学业上的指导。

论文的完成还要特别感谢杨轸老师，是他给予了珍贵的修改意见，提升了论文的品质，杨轸老师实验研究上的一丝不苟、实事求是、严格论证，让我受益良多。

感谢郭雪斌师兄、杜志刚师兄、蒋宏师兄对本研究课题做的前期工作，。

特别感谢本课题组的隋永芹、宋永朝、詹嘉、殷艳红、朱杰、吕明、徐小东、李少帅、王文修、伊轩、赵晓翠等，学习研究期间，我们亲如手足，在以后的日子里，也愿我们的友谊天长地久。；

在求学期间，为使我的学业有所长进，还有许多关心、支持和鼓励我的老师、同学、朋友们。在此，对所有提供过指导和帮助的师长和学友们表示深深的谢意！

回想读书生活，已经整整二十多个年头，其中饱偿学习的艰辛与快乐。感谢培养我长大含辛茹苦的父母，谢谢你们对我学习的支持！今天取得的成就多半要归功于你们的辛劳。如果今天我的成就是学有小成，那么你们的杰作就是我，我为你们感到骄傲和自豪。

2008年3月

## 个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

林涛, 男, 1982 年 6 月生。

2005 年 7 月毕业于同济大学 土木工程专业 获学士学位。

2005 年 9 月入同济大学读硕士研究生。

### 已发表论文:

- [1] 潘晓东, 林涛, 杨轸. 驾驶员心率血压与山区公路横向力系数关系. 同济大学学报, 2006, Vol. 34(6)
- [2] 潘晓东, 林涛. 不同路网形式大型商业广场交通影响分析. 华东交通大学学报, 2007, 8
- [3] 潘晓东、郭雪斌、杜志刚、林涛. 《基于人机工程学的道路平面线形评价指标的研究》. 国际公路安全研讨会论文集

### 研究报告:

- [1] 潘晓东, 杨轸, 蒋宏, 林涛. 林区旅游公路—内蒙古 S203 线交通安全实验研究报告. 2006
- [2] 潘晓东, 杨轸, 杜志刚, 林涛. 海峡西岸经济区综合交通枢纽建设研究. 2007
- [3] 苏州万达商业广场交通影响评价. 潘晓东、林涛等。
- [4] 喜马拉雅艺术中心交通影响评价. 潘晓东、杨轸、林涛等。