

摘要

由于国民经济增长的需要，我国公路交通运输得到了快速发展，因此公路的现代化管理成为公路交通发展的重要环节。目前，高速公路上交通事故频频发生，据公安交通管理部门统计，除了车辆和技术的因素外，高速公路交通事故的主要原因是车辆超速行驶。

高速公路的车辆超速已成为公路管理的突出问题，限制车速显然是交通安全运营管理的有效手段。为此国家对车辆公路运输进行了限速管理，旨在提高交通安全和保证车辆畅通。交通流越稳定，出现交通事故的概率越小，本文研究的目的是：通过合理限速，既能使交通流车速方差最小，保证交通安全，又能充分发挥高速公路的效益。

本文选题依托重庆交通科研设计院交通工程所承担的西部交通科技项目《公路隧道智能联动控制研究》，以大量实测数据为基础，同时参考大量国内外相关研究成果，采用理论分析、仿真相结合的方法，分析了驾驶员的生理心理因素对驾驶行为的影响、行车环境与交通事故的关系、公路隧道交通流特性、速度与事故的关系；建立了基于车速方差最小为目标的限速模型；提出了合理的限速值以及特殊路段的限速；用 vissim 仿真加以评价并应用到依托工程中。

关键词：高速公路；隧道；车速限制；安全；仿真

Abstract

With the development of economic, public road transport develop very fast, so the modern administrations become the key point. And traffic accident happen frequently on highways now, without the vehicle and technique elements, the main reason are over speed based on the calculation of traffic administration department.

Over speed on highways is a serious problem now, obviously, speed limit is an effective way to guarantee traffic safety. So the government uses speed limit to administrate vehicles on roads. The more stable traffic flow is the less traffic accident happen. So the target of the paper is not only make the variance of traffic flow to be smallest, guarantee traffic safety, but also make good use of the road based on proper speed limit.

The paper is according to a west traffic technology program 《Intelligent linkage control study on public road tunnels》accomplished by traffic department of Chongqing communications research & design institute, based on plenty of real and experiment data, refer to many research results from contrives. The paper used theory analyze, experiment and simulation to study the point, analyzed the influence from the change of drivers' psychological to driving behavior, the relation between driving environment and traffic accident, the relation of the character of public road tunnel traffic flows, speed and accident, built a speed limit model based on speed variance, raised a proper speed limit data on a normal and special part of roads, used vissim to simulate and apply to engineer.

Key words: High way; Tunnel; Speed limit; Safety; Simulation

重庆交通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，是本人在导师的指导下，独立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，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：周广振

日期：2008 年 4 月 9 日

重庆交通大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：周广振

指导教师签名：郭立

日期：2008 年 4 月 9 日

日期：2008 年 4 月 9 日

第一章 概述

1.1 课题来源

该课题属于西部交通建设科技项目——公路隧道智能联动控制技术研究的子课题之一。项目共分五个专题，分别为公路隧道限速方法研究、公路隧道安全预警模型研究、公路隧道事件检测应用研究、公路隧道安全预警设施配置方法研究及隧道火灾自动报警系统研究。项目依托工程选取了沪蓉国道主干线支线分水岭（鄂渝界）至忠县高速公路段（简称石忠路）的吕家梁和方斗山隧道。

1.2 研究背景

1.2.1 超速诱发高速公路安全问题

由于国民经济增长的需要，我国公路交通运输得到了快速发展，因此公路的现代化管理成为公路发展的重要环节。目前，高速公路的交通事故频频发生。据公安交通管理部门统计，2005 年，全国共发生道路交通事故 450254 起，造成 98738 人死亡、469911 人受伤，直接财产损失 18.8 亿元，因超速行驶导致 16015 人死亡，占到死亡总人数的 16.2%。除了车辆和技术的因素之外，公路交通事故的主要原因是车辆超速行驶。

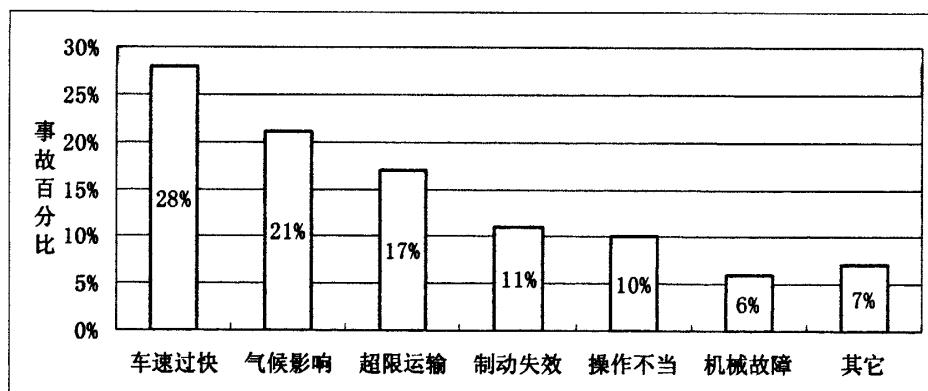


图 1.1 隧道事故原因分布统计

Fig1.1 The cause of the accident statistics of the tunnel

图 1.1 为隧道事故原因分布统计，在隧道事故中，车速过快达诱发事故原因的 28%。根据执法人员介绍，间距不足和操作不当而引发的事故很大程度也是由超速所间接导致的。

因此，高速公路的车辆超速已成为公路安全管理的突出问题，车速显然是交

通安全的一个重要控制因素。为此国家对车辆公路运输进行了限速管理，旨在提高交通安全和保证车辆畅通。实施车速管理后，在保证安全行车的同时，又有“高速不高”的社会舆论产生。原因是有些路段限制车速过低，既影响了运输效率又满足不了驾驶员的行车期望。

1.2.2 没有限速标准出台

目前我国高速公路隧道限速管理中还没有一套全面、详实、有针对性的合理限速及设置限速标志的方法、指南或规范。我国高速公路隧道近几年飞速发展，隧道数量和隧道长度不断增长，而限速问题也随之凸显出来。关于公路隧道限速方面问题，我国开展的研究还不够，因此相应的限速标准、规范和指南没有及时出台，造成道路交通管理者在选取限速值时，没有相应依据，限速设置混乱。

如何选择合理的限速值，平衡运输效益和交通安全的关系，使整体效益最大化，成为社会关注的热点和摆在交通工程研究人员面前的难题。

1.3 国内外发展现状

1.3.1 国外发展现状

美国的限速历史分为以下几个阶段：第一阶段为1974年之前；第二阶段为1974~1987年；第三阶段为1987~1995年；第四阶段为1995年至今。1974年国会通过法案确立了全国最高限速法案，即National Maximum Speed Limit，简称NMSL。该法案出台的背景主要是出于能源消耗方面的考虑，当时美国机动化水平已经与现在相差不大，而国际石油供应非常紧张，油价持续走高，能源问题已经严重影响了经济发展甚至触及国家战略，制定NMSL 的目的在于尽量使车辆行驶在经济燃油速度。随着石油供应问题的好转，美国逐渐放宽了NMSL 的限制。1987年国会允许各州将乡村州际公路行车条件较好路段的限速由55英里/小时（90公里/小时）提高到65英里/小时（105公里/小时）。美国幅员辽阔，各地的公路交通状况因其地形条件、设计标准、气候、交通、人文特点等而显现出较大差异，随着人们对安全、快捷的公路运输的呼声越来越高，在国家层面实施统一的NMSL不再适应现实发展要求。对此，1995年，国会取消了55英里/小时（90公里/小时）的全国最高限速，将限速的权限返还到各州^[1, 3]。

在具体确定限速值时，现美国公路基本上采用V85%限速，追寻源头，它是1941年关于“确定最大安全速度的政策方针”的产物。美国的研究机构通过观测良好天气条件下的V80%及V90%确定最大安全速度。而大部分道路管理机构更愿用V85%限速。美国研究人员的观测统计，10英里/小时（16公里/小时）最大速度概率分布区间（10 mile pace）包含了绝大部分（70%以上）车速值，研究还发现，车速位于该区间的车辆累积频率越大，车辆速度的离散性越小，美国部分的限速指南中也

有将该区间上限值作为限速值的主要参考依据的，但该区间的限值与V85%速度相差无几，两者在作为限速值设定基础是一致的^[3]。

美国道路机构在制定限制速度时，基于V85%的基础上，通常考虑其它因素，如：各州法定限速、历史事故、路侧发展等。“THE TRAFFIC DEVICE CONTROL HANDBOOK 2001”建议限制值应接近V85%速度，并应考虑交通控制特征、历史事故、道路条件等因素。

英国，加拿大，澳大利亚等多数国家限速的原则基本和美国相似，在V85%速度的基础上，综合考虑道路条件、历史事故记录适当折减。各国均接受Solomon关于事故与速度关系的论证，即事故与速度差的关系呈U形曲线，车辆在以平均速度一个标准差速度范围内行驶时，有较低事故率；平均速度加上10公里/小时附近位置（接近V85%速度），事故率最低。而且，发达国家的车速分布非常相似，即约70%的车辆速度集中在10英里/小时（16公里/小时）最大车速概率分布区间。

1.3.2 部分国家车速限制取值

由于限制最高车速可以提高安全性，各国一般都根据本国的实际情况对公路上行驶的车辆进行最高车速限制。下表列出了部分国家高速公路的车速限制值^[3]。从表中可以看出，各国的最高车速限制值差别很大。美国高速公路各州的限速不尽相同，宾州、新泽西州和纽约州限速都是90，加州是120km/h，而很多其它的州限速110km/h^[3]。

表 1.1 部分国家高速公路最高车速限制值

Table 1.1 Some national highway maximum speed limit

国 名	美国	爱尔兰	匈牙利	丹麦	波兰	保加利亚	土耳其
最高限速(km/h)	120~90	115	120	110	110	120	120
国 名	俄罗斯	德国	荷兰	捷克	南斯拉夫	挪威	日本
最高限速(km/h)	≤90	不限	120	130	120	90	100
国 名	希腊	瑞典	英国	比利时	芬兰	西班牙	葡萄牙
最高限速(km/h)	120	110	110	120	120	120	120
国 名	法国	奥地利	瑞士	卢森堡	意大利		
最高限速(km/h)	130	130	130	120	130		

1.3.3 国内发展现状

我国《道路交通安全法》规定，高速公路最高限速值不能超过 120km/h，最低限速不能低于 60km/h。在高速公路上行驶的小型载客汽车最高车速不得超过

120km/h，其他机动车不得超过 100km/h，摩托车不得超过 80km/h。

裴玉龙等对高速公路的车速标准差和亿车公里事故率的数据进行回归分析，建立了二者的关系模型，模型表明车速分布越离散，事故率越高，从而为高速公路的车速限制提供了理论依据。利用 1998 年我国 8 条高速公路的地点车速调查数据，对 15% 位车速、85% 位车速与单圆曲线的曲率变化率 CCRs 进行回归分析，分别建立了 85% 位车速与 CCRs 的回归模型以及 15% 位车速与 CCRs 的回归模型，利用这些模型提出了合理的基于交通安全的车速限制建议值^[2]。

1.3.4 我国限速存在的问题

1) 限速缺乏依据

目前我国高速公路隧道限速管理中还没有一套全面、详实、有针对性的合理限速及设置限速标志的方法、指南或规范。我国高速公路隧道近几年飞速发展，隧道数量和隧道长度不断增长，而限速问题也随之凸显出来。关于公路隧道限速方面问题，我国开展的研究还不够，因此相应的限速标准、规范和指南没有及时出台，造成道路交通管理者在选取限速值时，没有相应依据，限速设置混乱。

2) 限速手段不灵活

我国高速公路隧道限速手段不灵活，在设置限速值时往往一刀切。由于我国高速公路隧道多为单洞双车道，一般采用统一限速值，不分大小车型，不分车道。这显然是简单化和不科学的。

1.3.5 发展趋势

国内外许多学者从 85% 位车速来研究车速，尤其是通过建立 CCRs 回归模型，使限速更加合理，取得了明显效果。但目前的研究很少从驾驶员的驾驶行为和行车愿望出发来考虑这一问题。即使道路条件相同，不同的区域经济发展水平，驾驶员的期望行驶车速会有较大差异。主要是经济水平不同影响驾驶者的车辆性能、对行程时间（运输效率）的要求。驾驶员的车辆性能、驾驶技术、生理心理因素、生活环境等，决定了其在不同路况下对自由车速的选择、对限速条件的执行，个体之间存在很大差异。从驾驶行为的角度考虑限速，既符合实际也充分做到“以人为本”。

1.4 研究内容与研究方法

本项目拟在公路安全和运输效率取得平衡的前提下，寻求科学合理的车辆行驶速度。通过建立限速的数学模型，使各种车辆都能获得最佳的车辆限速值，在保证交通安全的基础上取得最大的运输效率。

1.4.1 研究内容

➤ 驾驶行为、行车环境与行车安全的关系

主要研究不同交通量、气候、照度、道路条件、隧道环境和车速分布与事故之间的关系。

➤ 高速公路合理限速方案的确定

通过调研分析与模拟仿真，建立限速模型，得出合理限速值，选择合理限速方法，确定最佳限速方案。

➤ 特殊路段的限速

特殊路段主要包括独立隧道、桥隧结合、隧道群、隧道与长下坡结合。作为事故多发路段，其限制速度的意义更加重大。

1.4.2 研究目的

交通流越稳定，出现交通事故的概率越小。本研究的目的是：通过选择合理限速值和限速方案对运行车速进行控制，既能保证交通安全，又能充分发挥高速公路的效益，同时避免“高速不高”的社会舆论。

1.4.3 技术路线

研究采用理论分析、实验调研、仿真相结合的方法，本文的技术路线为：

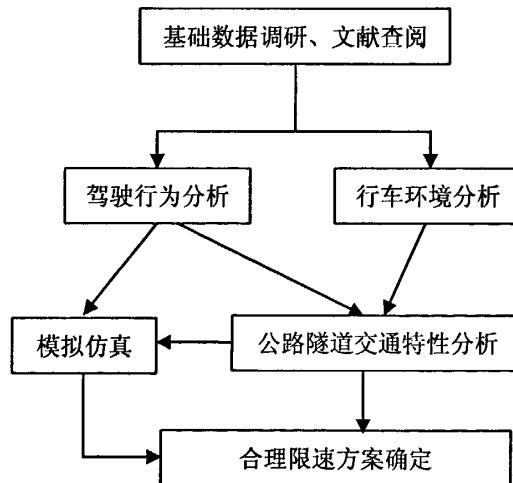


图 1.2 技术路线图

Fig 1.2 Technique courses chart

第二章 驾驶行为分析

在“人、车、路”交通系统中，人是主体，一切的活动都是由人来操作的。无论是道路线形、安全设施的设计还是运营管理，都要从人的角度出发，切实做到“以人为本”，体现人性化。研究驾驶员生理心理状态、限速条件下的驾驶行为以及驾驶员的行车期望，对选择合理限速值、避免社会舆论至关重要。

2.1 驾驶员交通心理生理分析

2.1.1 驾驶员生理分析

1)感觉阈值

感受性是以感觉阈限的大小来度量的对刺激的感觉能力。要引起感觉，刺激必须达到一定的量。那种刚刚引起感觉的最小刺激量称为绝对感觉阈限。低于阈限的刺激我们是感觉不到的。感觉阈限值低，表示感受性强，两者成反比关系。

外界刺激物要引起驾驶员的感觉，必须具有一定的刺激强度和足够的作用时间。而且，刺激强度较弱或作用时间较短时，产生感觉的时间则需更长^[4, 5]。

依据双眼视差原理，在辨别两个物体的远近差别时，两者的距离差必须大于一定的限度，否则区别不出远近来。根据实验材料证明，一般人的辨别远近的距离差别阈限如下表 2.1：

表 2.1 人辨别远近的距离差别阈限

Table 2.1 Identify the people from the difference between the distance threshold

对象距离（米）	可辨别深度差
1	0.37 毫米
10	3.8 厘米
100	4.15 米
1000	274 米
1300	深度知觉极限

试验数字说明：距观察者约 10 米的两物体，其相对距离差达到 3.8 厘米时，才能看出远近的差别；如果两者的距离差小于这一数字，便不能分辨两物体的远近。物体在 1300 米以外，观察者双眼视差便失去作用，这时必须依靠其它条件估计物体的相对距离。

2) 视感觉与车速的关系

人的眼睛注视前方，头部和视线固定时所能看到的全部范围称为视野。随着车速的增加，驾驶员的视野也缩小。当低速时，全视野为 90° — 100° ，当车速为 64km/h 时，视野减小为 74° ；车速为 81km/h 时，视野为 58° ；当车速为 97km/h 时，视野为 40° 。

汽车速度增加，驾驶员的视力会随之降低，这会缩短驾驶员对车外事物的视认距离。

驾驶员在行车中总是把注意力集中于前面的路面上，车速越高，注意力越集中，越难转移。另外，随着车速的增加，驾驶员的注视点也向前移动。根据实验，不同车速的注视点距离如下^[5]：

表 2.2 行驶速度与注视点距离

Table2.2 Monitor speed and gaze distance

行驶速度 (km/h)	注视点距离 (m)
40	183
72	366
105	610

3) 高速行车，容易对驾驶员形成道路催眠

在行车过程中，随着车速的加快，驾驶员空间辨别范围缩小，注视点前移，两眼凝视远方并集中于一点，形成“隧道视觉”，从而使外界的刺激物减少，只看到单调的暗色路面。在交通环境千篇一律的情况下，单调的信号对大脑皮层某些点的重复刺激，会导致神经细胞呈现抑制状态，形成道路催眠。

高速行驶时，驾驶员的反应错误增加

汽车高速行驶时，从眼前掠过的事物显著增多，单位时间内作用于眼睛的刺激量大大增加。根据实验研究，每分钟刺激物出现的次数越多，错误反应在全部反应中所占的比例越大。

4) 动作反应时间

传递刺激信号和大脑处理过程都需要一定的时间，这一时间称为反应时间（感觉的潜伏期）。反应时间又分为简单反应时间和复杂反应时间。简单反应时间是指对单一刺激信号做出动作反应的时间，一般时间较短，实验表明，简单反应时间为 0.152 秒。复杂反应时间也称选择反应时间，它是在各种不同的刺激信号之间选择一种或几种刺激信号并做出动作反应时间。在复杂反应时间中含有选择和判断过程。选择或判断的范围和信息量越大，复杂反应时间越长^[4, 5]。

心理上有无准备，对反应时间也有影响。对突然出现的刺激物，因心理上毫无准备，动作反应时间较长；对出现的刺激物有所预料，反应时间则较短。下表为驾驶员在有准备（期望）和突然条件下进行刹车试验时，所测得的刹车反应时间（包括简单反应时间、脚移动并踩下制动踏板的时间和制动器的延迟时间）。

表 2.3 在期望和突然情况下的刹车反应时间

Table 2.3 In expects and in the sudden situation braking reaction time

试验组	观察数		中位数(秒)		范围(秒)	
	突然	期望	突然	期望	突然	期望
A	10	10	0.88	0.60	0.7-1.1	0.5-0.7
B	10	10	0.60	0.50	0.6-1.0	0.5-0.8
C	10	10	0.90	0.55	0.7-1.0	0.5-0.8
D	10	10	0.70	0.55	0.6-1.7	0.5-0.8
E	10	10	0.60	0.55	0.5-0.9	0.4-0.6
总计(平均)	50	50	0.73	0.54	0.5-1.1	0.4-0.8

从上表可以看出，驾驶员在有无准备条件下的刹车反应时间差别很大。国内外许多统计资料也表明，反应时间与交通事故存在着重要关系。

5) 行驶中距离、车速的判断

a) 距离的判断

驾驶员在行驶过程中需要准确地估计距离，但实际上不易做到这一点。在尾随行驶中，驾驶员判断与前车的车头距离往往比实际的间距要小。美国某学者1972年对12名驾驶人员进行过两个试验，每次试验做了140次观察，经数据处理结果如下表：

表 2.4 车头间距的判断

Table 2.4 Vehicle front spacing judgment

项目	试验时的车速	80 公里/时			112 公里/时		
		30	91	152	30	91	152
试验一	实际的车头间距(米)	30	91	152	30	91	152
	驾驶员判断的车头间距(米)	21	55	85	15	40	64
试验二	指定的车头间距(米)	30	91	152	30	91	152
	驾驶员调整到的车头间距(米)	27	55	73	18	40	55

另外，车辆的大小也影响距离的判断。因为小车的轮廓尺寸小，体积小，容

易产生距离远的感觉。所以，一辆大车与一辆小车即使在相同的距离上，也容易认为小车的距离远。这种由于形状大小形成的视觉误差，容易引起尾随行驶时车间距离保持不足，诱发追尾相撞事故。

b) 车速判断

高速公路一般不存在会车，故本文不予研究驾驶员对迎面车的速度估计。

驾驶员对自己车速的情报来源有两个途径：车速表和凭感知觉进行判断。由视觉所观察到的周围景物变化是凭感知觉进行车速估计的主要依据。驾驶员在高速行车的过程中，往往无心去看车速表，而是凭主观感觉来控制车速。实践证明，速度控制不准是造成行车事故的一个重要因素。为此，人凭主观判断自己车速的误差是值得研究的。这也是本文限速研究的基础。在一试验中，选用 38 名有 5 年驾驶经历的驾驶员，在一英里长的平坦、直线道路上进行车速判断。试验过程中不让驾驶员看车速表。首先，驾驶员按试验要求，把车速加到规定的速度，当驾驶员凭主观感觉已达到规定车速时，用声音信号通知，试验者按车速表核对驾驶员的估计结果，并把当时的实际车速记录下来。然后，要求驾驶员把车速减低一半。当驾驶员主观判断已完成减速一半时，再次通告，试验者再次按车速表记录实际车速，按上述方法进行 5 种规定速度的试验，将结果绘图如下：

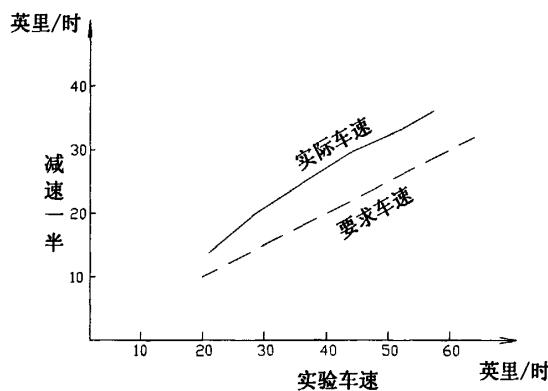


图 2.1 减速时的车速判断

Fig 2.1 Time deceleration vehicle speed judgment

从图 2.1 可以看出驾驶员减速后控制的车速比要求的车速（估计值）要高，即驾驶员在减速情况下对速度估计偏低。

在加速实验中，同样先让驾驶员凭感觉加到规定车速后核对车速表。然后，指示驾驶员将车速提高一倍，完成加速任务后再行通告，而后按车速表记录实际车速。按此方法试验 5 种规定车速，将记录结果绘图如下：

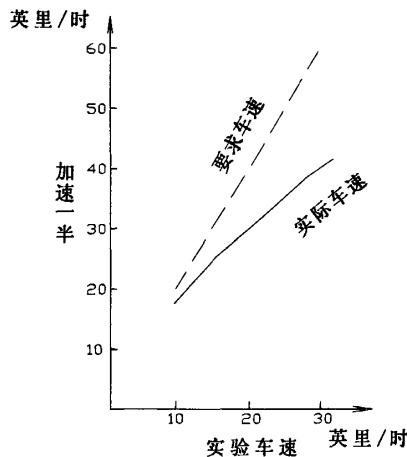


图 2.2 加速时的车速判断

Fig 2.2 Time acceleration vehicle speed judgment

从图 2.2 中可以看出，驾驶员主观感觉提高一倍车速，实际并未提高到规定的要求（估计值）。和减速时情况正好相反，驾驶员由低速转为高速时，易把车速估计过高。

c)速度适应性

人的视觉对光有明、暗适应性。人对速度也存在适应性。比如，驾驶员长时间在某一固定车速行驶之后，会觉得车速没有开始时那么快。“速度适应性”会影响驾驶员正确地判断车速。

通过一个速度适应性的试验，得出下表：

表 2.5 速度适应性试验结果

Table 2.5 Speed adaptability test result

实验条件	驾驶员主观估计为 40 英里/时的实际车速
以 70 英里/时行驶 5 秒钟	44.5 英里/时（低估 11.25%）
以 70 英里/时行驶 20 英里	50.5 英里/时（低估 26.25%）
以 70 英里/时行驶 40 英里	53.4 英里/时（低估 33.5%）

从表 2.5 中可以看出，驾驶员以 70 英里/时行驶 5 秒钟后，把车速减至 44.5 英里/时就认为是 40 英里/时的车速了，实际上他把实际车速低估了 11.25%。而且行驶距离（或行驶时间）越长，低估的百分比越大。可见，速度适应性所造成的影响，对行车安全十分不利。

d)相对速度的估计

尾随驾驶中，对两车间隙和相对速度的判断比对自己车速的判断更重要。为了防止撞到前导车上，尾随车的驾驶员应当能正确估计两车之间距离和前导车速度的变化。通常，驾驶员是依据前车的行驶速度来估计自己车速的，减速时低估自己的车速，而在加速时高估自己的车速。这种估计速度的准确度随训练程度和驾驶经验的增加而提高。

判断距离的能力能使驾驶员正确估计道路宽度、超车距离、选择可插间隙等。空间知觉在很大程度上取决于驾驶员的经验。

有经验的驾驶员不看速度表，能准确地判断汽车的速度。但是，持续高速行车之后，对速度的适时降低会估计不足。

恶劣天气也会造成距离、速度估计的错觉。能见度差时，会把物体距离估计得比实际距离远，对自驾车速的估计则有偏低的趋势。

2.1.2 驾驶员交通信息处理机理分析

交通系统运行优劣取决于车辆性能、道路条件、行驶环境以及驾驶员自身因素等诸多因素。只有把人、车、路、环境和管理作为一个统一的整体系统来考虑，才能正确揭示各环节之间的相互联系并正确评价各个环节乃至整个系统的性能。

本文给出的人—车—路—环境系统结构模型如图 2.3 所示^[5, 6]：

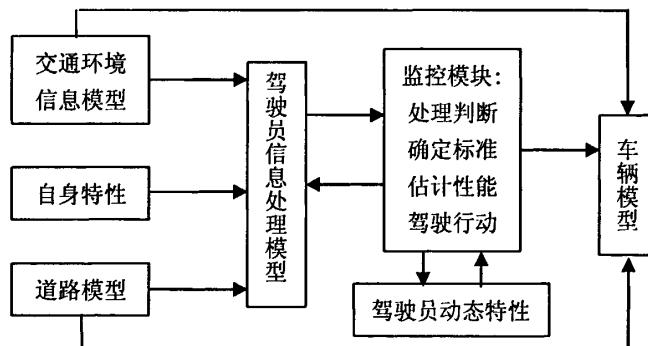


图 2.3 人—车—路—环境系统结构模型

Fig 2.3 Person - vehicle - road - environment system structural model

在此系统中，作为影响驾驶员的输入信息有交通环境信息、道路信息，驾驶员自身信息，还有其它行驶车辆的人—车系统信息，驾驶车辆信息等。当这些信息进入驾驶员信息处理模块后，经过驾驶员动态特性分析得到控制车辆行驶的决策，并执行该决策。在“控制”模块中，驾驶员凭借经验技能、姿态个性等个体因素以及外界因素的影响，利用对车辆的横向和纵向控制操作，将决策行为作用

于车辆模型，改变车辆的行驶轨迹和行驶方向等。之后车辆行驶参数的变化又将重新反馈给驾驶员，影响着驾驶员下一步决策和动作。

2.2 限速下的驾驶行为分析

2.2.1 限速对驾驶行为的影响

1) 驾驶行为的影响因素

Lewin 提出人类行为的著名公式为：

$$B = f(p * E) \quad (2.1)$$

式中：B——人的行为；

P——个体因素；

E——环境因素。

上式可以看出：人的行为是个人因素与环境因素交互作用的结果。人的行为不仅与个体有关，还会因所处的环境而出现不同反应。详细来说，驾驶员的现实行为主要受驾驶员的现实动机、现实能力、现实状态及周围环境的影响^[4]。

2) 限速条件下的驾驶行为模式选择

高速公路车辆高速行驶过程中，驾驶员遇到的信息相当复杂，通过上述对驾驶行为影响因素的分析，依据限速标志的视认及决策、操作过程的研究，进一步对限速标志下的驾驶行为进行探讨^[4, 5, 6]。

依据认知心理学和人机工效学理论，考虑到驾驶过程中的驾驶员个体因素的重要性和复杂性，根据前面驾驶员对限速标志的认读过程分析，从驾驶员自身角度出发，将驾驶行为和操作过程划分为认知、情感、避免危险、判断决策、动作五个大单元：

①认知单元：驾驶员在遇到限速标志时最早起作用的一个单元；

②情感单元：驾驶员在经过限速标志时的心理、性格、情绪上的影响因素；

③避免危险单元：主要是指经过限速标志时驾驶员对危险的认识度和重视度等；

④决策单元：主要是指驾驶员在发现限速标志后，经过感知判断所做的行为决策；

⑤操作单元：是指驾驶员决策之后进行动作的过程和行为单元。

上述各个单元分别受到前而所叙述的影响因素的制约。

通过上述分析以及驾驶过程的划分，在选择驾驶行为模式时，考虑驾驶员的动机因素、驾驶员自身心理生理因素以及避免危险的行为，运用驾驶员的危险回避行为模式进行分析。

危险回避模式总结了在特定情境中，驾驶员的动机系统在多种因素影响下进

行活动，最后导致反应决策，以及各种反应与情境相互作用，引起某种结果，而结果又反馈作用于动机系统的全部过程。这个模式的特点是：综合考虑了主观风险率和主观价值两个方面及其相互影响。如果单纯考虑主观风险率，那么可以设想驾驶员总是采取主观风险率为零的反应，而无法解释某些驾驶员有意的冒险行为。如果单纯考虑主观奖惩价值，那么可以设想驾驶员总是愿意保持相当的风险水平，而安全措施就会变得无意义，某种水平的事故率也是降低不了的。因此，只有把两者结合起来，才能较全面地理解驾驶员的动机和决策过程，才能设想改进的措施。

较高的主观风险率往往导致谨慎的反应决策，而较低的主观风险率则往往导致冒险的反应决策。只有在可选择的各种反应有大致相等的奖惩价值时，主观风险率才可能单独决定驾驶员对反应的选择，去采取主观风险率较低的反应。正因为有些显然冒险性很大的反应可能与相当诱人的奖惩有关，所以驾驶员有时会不顾主观风险率而做出反应决策。各种反应所引起的后果给驾驶员以信息反馈，影响他以后的动机活动和反应决策。驾驶员的主观奖惩价值也随每一次结果的信息反馈而变化。这个模式的各个环节及其动态关系，如图 2.4 所示^[8]：

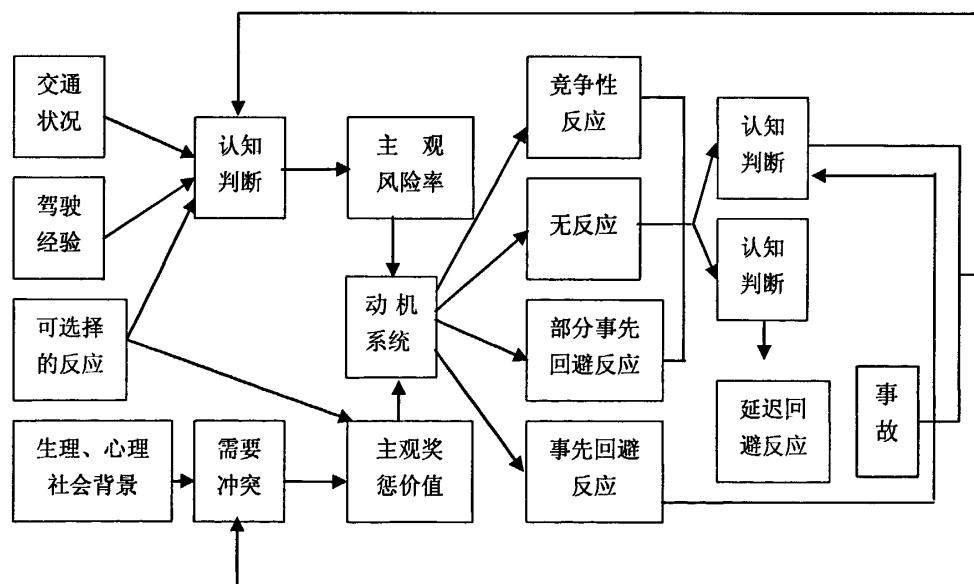


图 2.4 驾驶员危险回避行为模式

Fig 2.4 Avoid dangerous driver behaviour patterns

3) 限速下的驾驶员速度选择模型

当交通量饱和度较大时，车辆行驶成跟驰状态，目标车辆速度选择主要受前导车的影响。故本文只考虑自由流状态下，单个车辆在经过限速标志的速度选择问题。

在自由流状态下，针对驾驶行为进行建模之前，首先根据实际调研和问卷调查的内容，做出如下假定：

- 驾驶员在行车过程中的车速不受邻近其他车辆的影响(在自由流下其他车辆速度对目标驾驶员的车速影响不大，可忽略)；
- 道路条件良好，交通流平缓，无交通阻塞事件发生，并且很少有换道状况的发生；
- 综合考虑交通信息的复杂性，这里主要考虑视觉信息，没有考虑听觉噪音干扰的影响，以简化分析过程；
- 考虑的车辆基本为小轿车(或换算为小车)。

基于上述假设，下面对经过限速标志时驾驶员速度选择行为进行分析。

通过对限速条件下不同车辆的初速度以及驾驶特性分析，自由流行驶下，驾驶员在经过限速标志时的行驶速度可以用下式 2.2 表达。假设其中位初速度是 V_0 ，限速标志的速度影响模型^[9]如下：

$$V_T = \frac{V_0}{1 + c \cdot d^z} \quad (2.2)$$

式中， V_T ——限速标志区间内，自由流车辆的中位车速；

V_0 ——进入限速标志区间前，自由流车辆的中位车速；

$z = \frac{V_g}{V_0}$ ，即限速标志的限速值 V_g 与 V_0 的比值；

c, d ——影响模型的标定常数。

值得注意的是模型中是对中位车速进行修正，为了得到任意车速的修正速度，可按下式计算：

$$V_0^Q - V_T^Q = V_{0_i}^Q - V_{T_i}^Q \quad (2.3)$$

式中： V_0^Q, V_T^Q ——受限速标志影响前、后自由流车辆的中位车速；

$V_{0_i}^Q, V_{T_i}^Q$ ——受限速标志影响前、后自由流车辆的任意车速；

Q ——修正系数，其值越小，表示对自由流速度的影响越大。

通过上述影响模型以及修正模型，将理想条件下的自由流车辆的速度转变成为受道路设施的限制而实际采用的自由流速度。

4) 模型标定

为了对公式(2.2)进行标定，首先对该式进行变形整理，步骤如下：

将(2.2)变形为:

$$\frac{V_0}{V_t} - 1 = c \cdot d^{z^2} \quad (2.4)$$

两边取对数得:

$$\ln\left(\frac{V_0}{V_t} - 1\right) = \ln c + z^2 \ln d \quad (2.5)$$

式中: V_t, V_0 即为限速前后的中位速度; V_g 是限速值, 则 $z = \sqrt{\frac{V_g}{V_0}}$;

c, d 是影响模型的标定常数。

可以将上式写成如下形式:

$$Y = A + BX \quad (2.6)$$

这样, 问题转化为对式 (2.6) 进行标定, 标定的系数是 $\ln c$ 和 $\ln d$ 。 V_t, V_0 和 Z 的值可通过计算样本值求得。

在获得方程的基本形式之后, 本文利用普通最小平方法 (OLS) 计算得到系数 A, B 的值。现假设回归方程为:

$$y_i = b_0 + b_1 x_i + e_i \quad (2.7)$$

OLS 方法有两个基本要求:

$$\textcircled{1} \sum (y_i - \hat{y}_i) = 0$$

$$\textcircled{2} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min.$$

令 $Q = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2$, 为求 Q 达到最小值时的 b_0, b_1 , 对 Q 求关于 b_0, b_1 的一阶偏导数, 并令其等于零, 可得到方程组, 解此方程组, 即可得到上述两个系数的值。

2.2.2 驾驶员遵守限速情况

为了验证限速标志的设置是否有效, 设置相关问题对限速标志的遵守情况进行问卷调查。在规定和设想的路况情境下, 让驾驶员选择其速度行为, 根据结果统计如下表 2.6 所示^[6]:

表 2.6 看到限速标志后的遵守情况

Table 2.6 See the speed limit signs after the compliance

	频数	百分比	累计百分比	百分比
从不减速	14	12.3	12.3	33.4
偶尔减速	24	21.1	33.4	
时常减速	46	40.3	73.7	66.6
频繁减速	30	26.3	100.0	
总计	114	100.0	100.0	100.0

从表 2.6 中可以看出，很少遵守和从不遵守限速标志的比例达到 33.4%，大多数情况下能够遵守限速标志的驾驶员的比例为 66.6%，说明遵守限速标志的驾驶员还是多于不遵守的人数。限速标志在实际的行驶过程中起到了一定的作用，但是作用还不是很明显。

违反限速标志的原因主要有三种：没注意限速标志的存在；车速判断错误，认为当前车速低于限速值；喜欢开快车，故意不减速。

对于改善限速标志的遵守情况可以采取辅助设施：增加电子眼；标志提醒进入测速区等。

下图为限速标志与测速区提醒标志，可以对驾驶员起到震慑作用，增加限速的遵守情况。



图 2.5 标志提醒测速区

Fig 2.5 The symbol reminder measures the fast area

2.3 驾驶员对限速值的期望

2.3.1 路段的限速期望

通过对重庆市数位驾驶员的问卷调查，得出了驾驶员对于路段的速度期望限制值。

1) 针对驾驶员不同性别、年龄，与驾驶车辆的性质对比较典型的驾驶员进行了抽样调查，调查结果统计表如下：

表 2.7 抽样调查统计表

Table2.7 Sample investigation statistical table

被调查者	私家车 驾驶员	专职车 驾驶员	客运公司 驾驶员	货运公司 驾驶员
期望限速值 (公里/小时)	100—110	110—120	80—100	80—90

2) 参考重庆晚报新闻关于“限速 80 公里高速路名不副实”时评，从 60 多份驾驶员的评论可以看出 90% 的驾驶员认为当前高速公路限速值过低，造成超速罚款，期望限制车速提高，并期望不要“一刀切”限速，根据不同路段科学确定限速值。

2.3.2 隧道的限速期望

2007 年 8 月份，对重庆中梁山隧道、湖北女娘山隧道、广东石门坳隧道做了运营管理调研，下表为关于驾驶员对现有限速值的满意度：

表 2.8 限速值问卷调查结果

Table2.8 Speed limit of the survey results

隧道	重庆中梁山隧道			湖北女娘山隧道			广东石门坳隧道		
限速值	60			80			80		
问卷数	1001			201			1164		
问卷选项	合理	一般	不合理	合理	一般	不合理	合理	一般	不合理
各项数	522	326	153	119	36	46	409	328	427
各项比例	52.1%	32.6%	15.3%	59.2%	17.9%	22.9%	35%	28%	37%

对于重庆中梁山隧道，行车环境较差，车流量较大，驾驶员出于安全考虑不敢开快车，故对于限速 60 大部分人都能接受；湖北女娘山隧道交通量较小，而限速 80 主要是不满足部分小车的车速要求；对于广东石门坳隧道，由于当地经济水平和运输效益的要求以及车辆性能较好，驾驶员普遍期望提高车速限制值。

隧道的限速，总体来看，如果行车环境较好，小车驾驶员的期望限速值为 90—110；大车的期望限速值为 70—90。

2.3.3 驾驶员们总体期望和要求

- 根据实际道路状况，在安全行使下分路段科学合理的限制车速；
- 适当提高限速值；
- 减少罚款。

第三章 行车环境与事故的关系

不同的行车环境下，驾驶员对行驶车速的选择不同。影响驾驶员车速选择的因素主要有交通量、气候、照度、道路条件等。研究行车环境与事故的关系，主要是用来确定限速方案。

3.1 交通量与事故的关系

道路上的交通量的大小对交通事故的发生有着直接的影响。交通量与交通流饱和度直接相关，而交通流饱和影响交通事故的频率和严重程度。

国外许多学者对交通量与事故的关系进行了研究，发现交通量较低时事故率非常高，当V/C接近1.0时，事故也较高，并回归出一条U形曲线模型来表示交通量与事故率的关系^[9]。

国内吉小进等通过23个基本路段6年的交通数据计算，得到高速公路基本路段V/C比与事故率的关系曲线为U形曲线，与国外研究结论在曲线线形上基本相同^[10]。

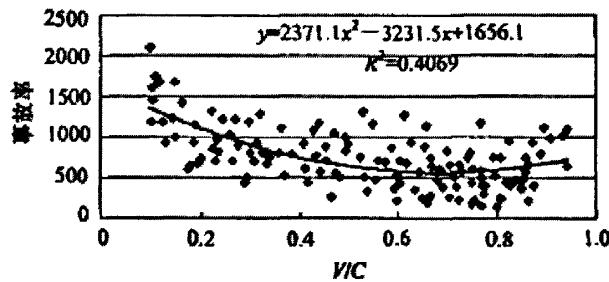


图3.1 高速公路基本路段V/C比与事故率关系曲线

Fig3.1 Basic sections of Highway V / C ratio and the accident rate curve

图3.1中的函数关系式，y表示百万公里每车小时事故率，x表示V/C比，从图中曲线可以看出，V/C比较低时，事故率比较高，随着V/C比的增大，事故率也逐渐下降；当V/C比为0.68时，事故率达到最低；V/C比再增大时，事故率又逐渐增大。一般隋况下，V/C比总是大于0小于1。V/C比与事故率的关系呈U形曲线，主要原因在于当交通量较小时，即V/C比较小时，路面比较空旷，车辆之间的相互干扰很小，行车自由度较高，此时，车速往往很高，因此容易产生安全隐患，而且造成事故比较严重；根据交通工程原理，行车速度与交通密度成反比，随着交通量的增长，V/C比值增大，道路的利用率变高，车辆间有一定的干扰，行车速度也随之降低，司机此时警惕性也增强，所以交通事故率下降；当V/C比达到一个比较大的值，事故率达到最低；但是随着V/C比再进一步增大，此时交通密度很大，车速较低，使得超车的需求增大，冲突也随之增大，事故率逐渐

回升，但此时事故的严重性降低。

下图 3.2 为交通事故率与饱和度的关系，从图中可以看出，交通量对事故的影响可以分为以下几种情况^[9, 10, 11]：

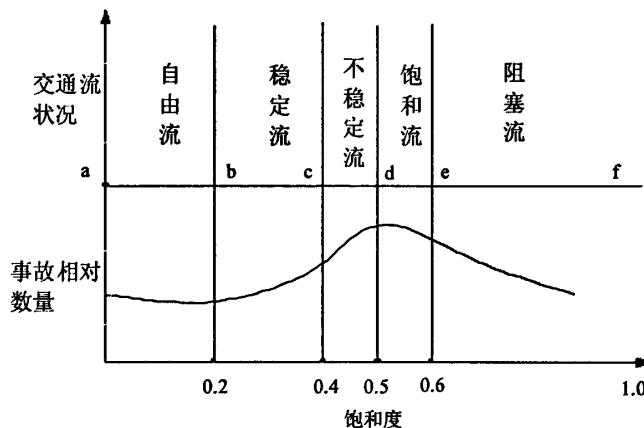


图 3.2 交通事故率与饱和度的关系

Fig3.2 Traffic accidents relations with the traffic degree of saturation

3.2 气候与事故的关系

道路表面与轮胎之间的摩擦系数通常用来衡量道路表面的抗滑能力。行车时道路表面的抗滑能力对交通安全有着重要影响。同样一条路，如果表面干燥、清洁，抗滑能力就高，若是表面潮湿或覆盖冰雪，路面抗滑能力就会很低，容易发生交通事故。因此，决定道路表面性能的客观条件主要是气候条件。

交通事故原因的分析表明，影响隧道交通事故的主要因素除了驾驶员的综合素质、车辆的安全技术性能、道路条件、交通安全设施和管理水平外，还包括气候条件（如雨、雾、大风、冰冻等）这个重要因素。气候条件对路面的影响改变了路面的状态，破坏了轮胎与路面的正常接触状态，因而诱发事故。

天气状况对隧道交通安全影响和一般道路有明显的区别，后者由于天气原因所引发的交通事故发生在全路段或者路况较差的地方。隧道由于天气原因所引发的交通事故多发生在隧道出入口路段 50 至 200 米的地方。行驶在干燥路面上刹车效果比在潮湿路面上刹车效果好。在潮湿路面上刹车时，有时车轮会打滑，滑行距离长且方向不易控制，这就说明路面在潮湿状态下，车辆轮胎与路面之间的摩擦系数要比在干燥状态时显著减小。下图 3.3 时某机场跑道在干湿不同状态下摩擦系统的变化。从图中可以看出摩擦系数随着速度的增加而减少，且干燥路面减少较少，而潮湿路面则显著减小。

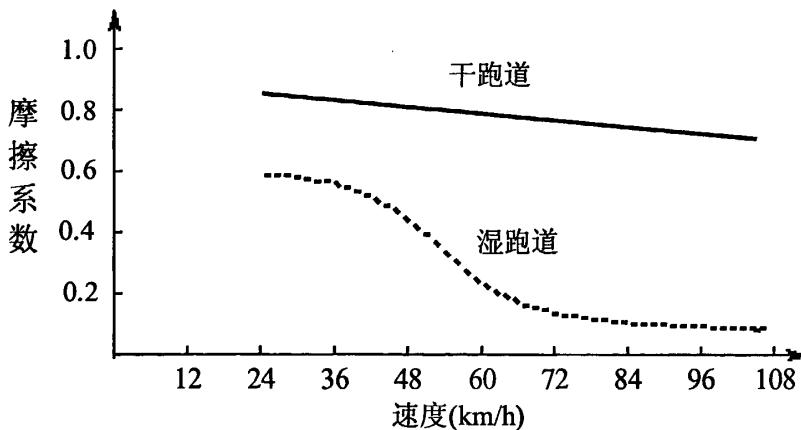


图 3.3 路面在干湿状态和不同速度下的摩擦系数变化情况

Fig3.3 Wet and dry roads in the state and different speed changes in the friction coefficients

在进出隧道的普通道路与隧道连接处，雨雪天导致普通道路路面的摩擦系数发生显著变化，而隧道内路面摩擦系数不受气候影响，进出隧道的驾驶员常常忽略这种变化。因此，隧道出入口段在干湿道路的连接处常诱发交通事故。

3.2.1 路面抗滑性能对行车安全的影响

美国宾夕法尼亚州调查的路面状况和交通事故率的关系表明，如果路面干燥时发生事故危险的比率是 1 的话，那末路面潮湿、降雪、结冰时，危险比例大致相应为 2、5 和 8，如下表 3.1 所示：

表 3.1 路面状况与交通事故率关系

Table3.1 The relations between road conditions and traffic accident rate

路面状况	每百万车公里交通事故率
干燥	1.6
湿润	3.2
降雨或雪	8.0
结冰	12.8

沈大高速公路 1994 年不同天气情况下的事故分布示于表 3.2。统计数字显示：晴天交通事故次数占总事故次数的比例最大，这是因为晴天占全年时间的百分比也最大，超过 70%；其次为雪天和雨天。但计入不同天气持续时间占全年比例后分别计算出雪天、雨天及晴天等的平均每天事故次数，结果表明，雨、雪天事故率高于晴天，其中雪天事故率最高。雨、雪天事故率高的原因是雨、雪天路面摩擦系数明显低于路面干燥状态的路面摩擦系数，影响驾驶员行车时的视线、视距范围和刹车距离，同时路面泛油、路段排水不畅或较陡的纵坡路段也在某种程度

上促成了事故的发生^[11]。

表 3.2 沈大高速公路事故次数随天气的分布

Table3.2 Shenyang-Dalian highway accident frequency distribution with the weather

天气情况		晴天	雪天	雨天	阴天	雾天	大风天	其它
事故分布	事故次数	626	118	81	28	10	4	9
	占总事故次数的百分比(%)	71.46	13.47	9.25	3.20	1.14	0.34	1.14
全年天气分布	持续天数		271	19	24	28	10	3
	占全年百分比(%)		74.25	5.20	6.58	7.67	2.74	0.82
平均每天事故次数		2.3	6.2	3.4	1.0	1.0	1.3	0.9

3.3 照度与事故的关系

当道路上的交通流密度达到一定程度以上时，应设置道路照明，一般道路的照明只是在夜间为驾驶员提供一个合适的视觉环境，各国学者一致认为，它可以在一定程度上降低交通事故的发生。而公路隧道的照明不仅在夜间，白天也是如此，可以这样认为，隧道的照明白天比夜间更重要，这是基于以下原因：

(1) 驾驶员在隧道入口的视觉效应

当汽车驶近没有适当照明的隧道时，因隧道长度不同，驾驶员会产生不同的反应。一是在通过短隧道（长度在 200m 以内）时，车辆刚驶近隧道，就能看到隧道出口及外部的景物，由于隧道出口外的亮度很高，而隧道内的亮度很低，对比度过大会在出口外造成眩光，而在隧道内的周边产生严重的阴影，此称为“黑框效应”。如果在“黑框”范围内有障碍物存在，则驾驶员往往难以辨认，甚至不能察觉。第二种情况是看不到隧道出口及其洞外景物的较长隧道（长度在 200 以上），车辆驶近隧道口时，在驾驶员视野中的天空，附近建筑物等的亮度远比隧道洞内的亮度高，虽然洞口实际上也有一定的亮度，但在感应现象（即当驾驶员的视野有许多亮度不同的景物同时出现时，如反映到视网膜上的各物像之间亮度差异过于悬殊，而发生的无法详细观察较低部分景物的现象）的作用下，驾驶员仍感到洞口很黑，像个“黑洞”，以至无法辨认洞口附近的情况，连障碍物也难以发现。这两种效应对汽车在隧道内的安全行驶都带来严重的影响。

(2) 隧道入口区的视觉适应

由于人眼视网膜锥体细胞和杆体细胞的感光能力存在着差异，使得暗适应与光适应的时间差异较大，驾驶员驾驶车辆从一个亮度很大的视场突然进入一个暗

视场中，视觉的暗适应时间一般需要 5~10 分钟，完全适应则需要 30 分钟，特别是在刚开始的数十秒内，驾驶员几乎不能视认视场中的有关障碍物，这对隧道入口区的行车安全影响很大。而在出隧道时，是从一个暗环境进入一个高亮度的视场，这种光适应则时间较短，一般只需要数秒，最长不过一分钟，给驾驶造成的视觉障碍物相对较轻。因此，影响最大的即为进入隧道的视觉暗适应。

所以，隧道中的照明水平，特别是入口和过渡区的照明对安全行车将起到重要的影响，然而这一方面在我国的有关隧道设计中还没有引起足够的重视。

3.4 道路条件与事故的关系

作为道路交通的基础设施和车辆行驶的根本条件，道路对交通安全的影响不可忽视。道路条件因素主要包括平面、纵断面、横断面、视距及线形组合与道路交通事故的关系。

3.4.1 平曲线半径

交通安全与道路几何线形设计密切相关。交通事故通常在道路平曲线处发生，尤其是急弯路段。

1) 曲线半径与行车速度之间的关系^[13]

通过实验来说明二者之间的关系：实验选取驾驶员为驾龄在 3 年以上，45 岁以下。A 组为常在选定的高速路上行驶的驾驶员，B 组为不常在该路段行车的驾驶员。让各组在选定路段上行驶，记录其速度。

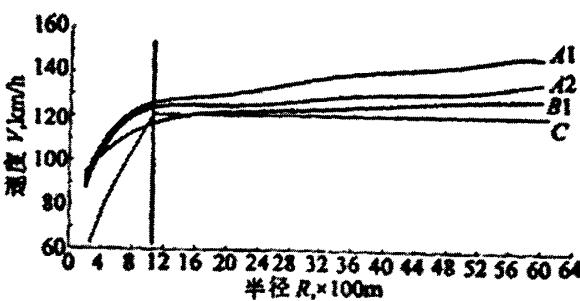


图 3.4 高速公路平曲线半径与行车速度之间的关系

Fig 3.4 Relations between highway traffic horizontal curve radius and running speed

图 3.4 中曲线 A1 为驾驶员组 A 在无超车条件下速度与半径的关系，曲线 A2 为驾驶员 A 组在有超车条件下速度与半径的关系。曲线 B1 为驾驶员组 B 在无超

车条件下速度与半径的关系。曲线 C 则是规范提供的 R-V 关系。

从上图可以看出：曲线 A1、A2 在形状上一致，A2 始终在 A1 的下方，半径较小时，二者相差 3~4km/h，半径较大时相差 10~12km/h；曲线 B1 相比 A1、A2 形状上要平缓的多，在大小上除在小于 350m 之内有交点外都小于 A1、A2；图中曲线 A1、A2、B1 大体上与设计速度曲线 C 的形状、变化相一致，总体上都高于规范提供的 R-V 关系曲线 C，且半径越小差别越大，在最小半径 200m 处，不管是 A1、A2 还是 B1，都比规范规定的最大速度高出 30km/h 左右；其后，随半径增大，这种差值逐渐变小，直至在半径为 1 000m、速度为 120km/h 附近才比较趋于一致。在平曲线半径 $R < 1 000m$ 时，平曲线上的行驶车速对半径的变化非常敏感。

2) 平曲线半径与事故关系^[11]

下面为沈大高速公路（1994 年 1 月至 1995 年 6 月）不同路段平曲线半径与对应的平均亿车事故率统计数据（表 3.3）。

表 3.3 沈大高速公路不同平曲线半径下的平均亿车事故率

Table 3.3 Under ShenDa highway different horizontal curve radius of the average 100 million

vehicle accident rate										
平曲线半径(m)	470	500	550	700	1000	1100	1200	1500	2000	2500
平均亿车事故率	401.36	442.81	582.62	253.74	103.00	82.58	98.40	81.17	102.58	81.05
平曲线半径(m)	3000	3500	4000	5000	5500	6000	7000	8000	9800	9900
平均亿车事故率	67.41	52.50	48.73	41.33	25.98	28.85	27.45	20.80	18.49	13.20

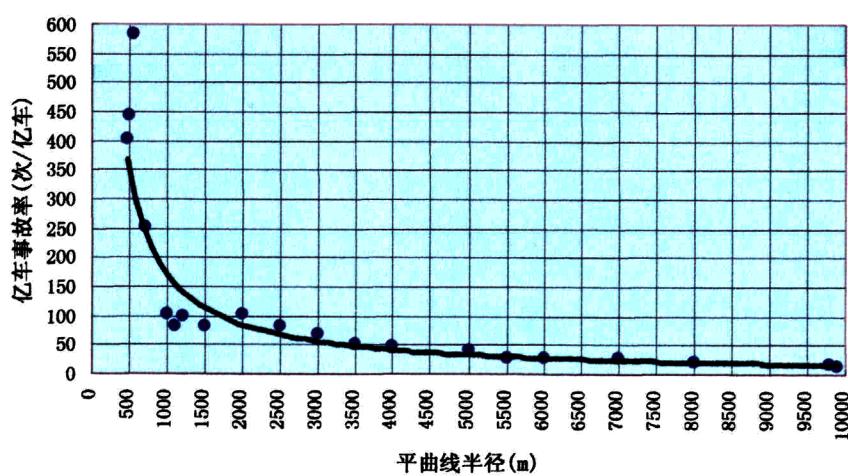


图 3.5 沈大高速公路亿车事故率与平曲线半径的关系

Fig 3.5 Shen-Da highway relations between billion car accident rate and the horizontal curve radius

分析平曲线半径与平均亿车事故率的散点图,发现二者呈幂指数关系(如上图3.5),通过统计分析得到如下关系模型:

$$AR = 189194R^{-1.0143} \quad (R^2 = 0.926) \quad (3.1)$$

式中: AR ——平均亿车事故率, 次/亿车;

R ——平曲线半径, m。

由回归曲线及关系模型可知,随着平曲线半径的增大,事故率在降低。当平曲线半径大于2000m时,平曲线上的事故率低于沈大高速公路全线的平均水平(68.73次/亿车)。此时,随着平曲线半径的继续增大,交通安全状况逐步趋于良好。但从另一方面看,当平曲线半径小于1000m时,随着半径的减小,事故率却急剧地增加;当平曲线半径减小至400~600m时,即接近重丘区高速公路极限最小半径(400m)时,事故率已高出全线平均水平的5至6倍,交通安全状况十分严峻。由图3.5可见,沈大高速公路的曲线半径拐点约为1000m。

图3.6示出了1968年美国公路事故次数与平曲线半径的关系,我国高速公路事故与平曲线半径的关系和国外的统计分析结果基本一致,即当平曲线半径较小时交通安全状况恶化;随着平曲线半径的增大,交通安全状况趋于良好。如图3.6所示,美国公路的曲线半径拐点为400m,它是综合所有等级公路的事故与曲线半径的调查结果得到的,比较具有代表性。根据极限误差原理,半径为400m对应的事故率加倍后对应的曲线半径为200m,故200m曲线半径对应的事故率被认为是极限可接受的事故率水平。我国目前还没有充足的统计资料进行综合分析和参数标定,本文虽然对高速公路的曲线半径进行事故率研究,但得到的曲线半径拐点仅适用于曲线设计良好的高等级公路,不具有代表性,因此公路曲线半径的安全设计拐点仍然取美国的研究结果400m,极限可接受的曲线半径为200m。另外,从图3.5与图3.6的对比可知,当曲线半径均为2000m时,曲线半径的继续增加对交通安全的改善效果并不明显,此时的交通事故率令人满意,这与美国的研究结果相同。

引入平曲线半径影响系数RF来表示平曲线半径对交通安全的影响程度,平曲线半径越小,RF越大,亦即对应的平曲线越不安全。在确定曲线半径的影响系

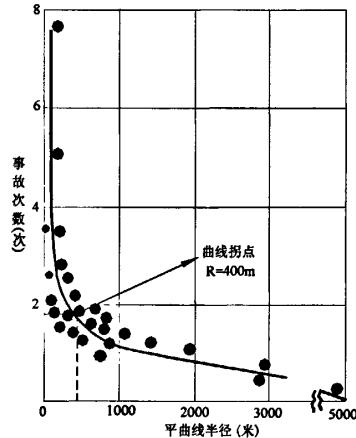


图3.6 美国公路事故次数与平曲线半径

数时，采用半径为 2000m 时的 RF 为 1，即车辆在该曲线上的行驶条件实际上与在直线路段上的行驶条件没有区别。半径小于 2000m 的 RF 系数依统计资料确定，这些系数按与最大半径的比值计算得出。如表 3.4 所示^[14]。

表 3.4 曲线半径与影响系数的关系

Table3.4 The relations between curve radius and influence coefficient

平曲线半径	$R \leq 50$	100~150	200~300	400~600	1000~2000	$R \geq 2000$
曲线半径影响系数 RF	5.4	4.6	2.25	1.6	1.25	1

所谓交通事故降低系数 ARF (Accident Reduction Factor) 是指改善措施实施后交通事故的降低值与原有交通事故数的比值。表 3.5 为瑞典在车速限制为 90km/h 的条件下，道路曲线半径的增加对交通事故降低的影响情况^[15]。当曲线半径从 300m 提高到 500m 时，ARF 明显增加，这进一步说明 400m 可以作为考虑交通安全时曲线半径选择的拐点（特征点）。

表 3.5 随曲线半径不同增长变化的 ARF

Table3.5 Along with curve radius different growth change ARF

ARF	变化终值 R (m)		
初值 R (m)	500	700	1500
300	0.25	0.35	0.45
500	—	0.10	0.30
700	—	—	0.20

根据以上分析及相关研究成果，可以得到以下结论：

- 大量交通事故与急弯（小半径平曲线）有关。
- 交通事故的危险性（通常以交通事故率表示）和严重性随着曲线半径的增加而降低。
- 曲线半径低于 200m 的路段其交通事故率要比曲线半径大于 400m 的路段至少高一倍。
- 从交通安全方面考虑，400m 是曲线半径选择的参考值。
- 当曲线半径大于 2000m 时，曲线半径的继续增加对交通安全的改善效果并不明显。

- 具有相同或相近曲线半径路段的安全性高于曲线半径各不相同的路段，尤其长直路段中突然插入一段小半径的平曲线，对于行车非常不利。
- 对于公路来说，调整平曲线线形是提高交通安全性最有效的途径之一。

3.4.2 纵坡度

道路纵坡段的交通事故较多，车辆行驶过程中往往需要紧急刹车。由于下坡行驶的制动距离要比上坡行驶的长，因此下坡事故数要比上坡事故数多；上下坡行车条件的差别，在较小纵坡条件下就有所反映。

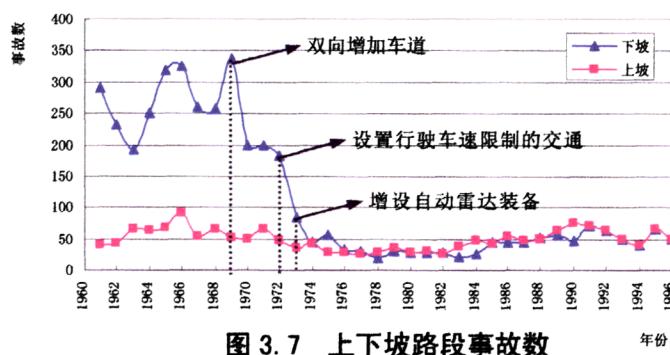


图 3.7 上下坡路段事故数

Fig3.7 Climbs or descends the road section accident number

图 3.7 为美国 Elzer Mountain 地区 7.2km 长的山区路段^[15]，在采取安全保障措施之前，下坡事故数要比上坡事故数大很多。1969 年双向增加车道后，上下坡事故数均有所减少，尤其是下坡事故数下降显著；1972 年设置限制车速的交通标志牌后，下坡事故数又有大幅度下降，上坡事故数也有所下降；1973 年增设自动雷达车速控制系统后，总体交通事故数下降。在 70 年代末，下坡交通事故数相对稳定下来，并且在绝对数值和相对趋势上基本与上坡保持一致。由此可见，在纵坡路段采取增加车道、设置安全标志等交通改善措施对于促进道路交通安全非常有必要。

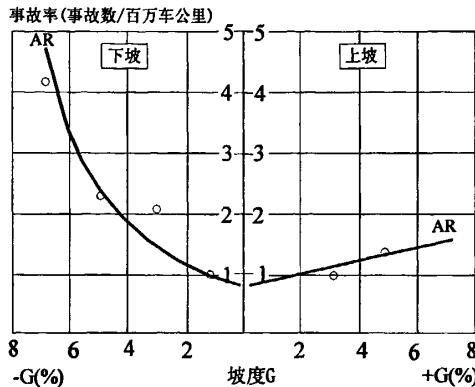


图 3.8 事故率 AR 与坡度 G 的关系

Fig3.8 Relations beween accident rate AR and slope G

图 3.8 为德国交通事故率 AR 与纵坡的关系曲线^[15]：当纵坡在 0~2% 之间时，上下坡事故率基本相同，而且数值很小；当纵坡在 2%~4% 之间时，下坡事故率开始大于上坡 AR，而且下坡事故率曲线迅速上升；当纵坡大于 6% 时，上坡事故率 AR 上升缓慢，下坡 AR 继续迅速上升，而且开始成倍增加。由此可见，下坡路段比上坡路段更危险。

根据国道 318 线四川省境内交通事故的统计数据，得出了如图 3.9 所示的纵坡坡度与事故率的关系^[16]。

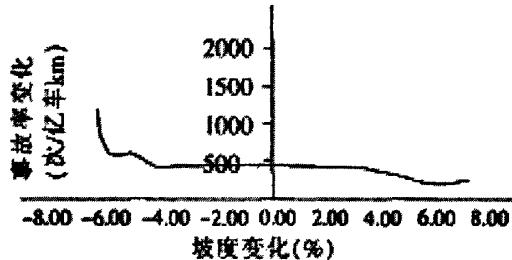


图 3.9 纵坡坡度与事故率的关系

Fig3.9 Relations beween Vertical grade slope and the accident rate

从图 3.9 中可以看出。道路坡度与交通安全存在联系，处于下坡阶段时；随着坡度的增加。交通安全性降低，当坡度 >5% 时事故率增加速度较快；处于上坡阶段时，随着坡度的增加。事故率的变化只在较小坡度范围内有微小增加。当上坡坡度较大时，事故率基本无大的变化，甚至有减小的趋势。

根据以上及相关研究成果分析可得到以下结论：

- 坡度在 0~2% 之间最为合适。
- 低于 6% 的坡度对交通事故率 AR 影响不明显；当坡度大于 6%，事故率

会突然显著增加，这种变化在下坡路段尤其明显。

- 只要提供足够的停车视距，竖曲线的几何特性并不影响道路交通事故率。
- 采取适当的道路改善和交通安全措施，可以明显提高道路纵坡的安全性。

3.4.3 车道数与横断面型式

1) 车道数

总体来说，行车安全性随车道数的增加而提高，即车道数越多，行车越安全。

2) 路面宽度

一般来说，较宽的路面有利于行车安全，因此道路交通事故率 AR 随路面宽度的增加而降低。图 3.10 为美国双车道公路事故率 AR 与路面宽度的影响关系^[3]。

总体来看，AR 与路面宽度基本上呈线性关系，路面越宽，AR 越小。

3.4.4 视距

视距是保证道路行车安全的重要因素之一，与道路的平面线形和纵断面线形有密切关系。在平曲线与竖曲线上超车时发生的道路交通事故，经常是由于视距不足。交通事故数不仅与存在视距不足的路段有关，而且与这种路段的分布概率有关。

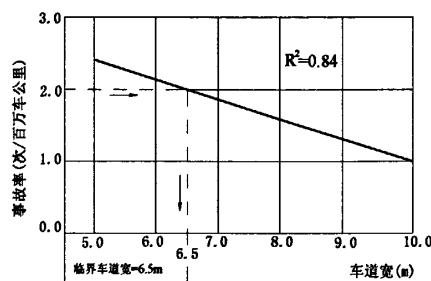


图 3.10 双车道公路事故率 AR 与路面宽度

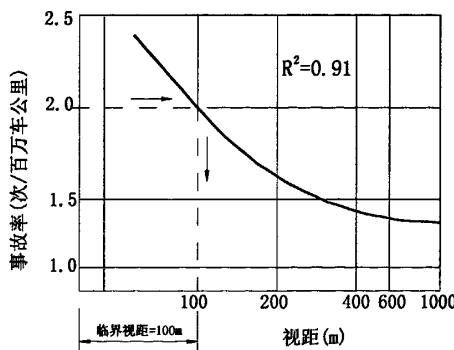


图 3.11 事故率 AR 与视距的关系

Fig3.11 Relations between Accident rate AR and apparent distance

图 3.11 为美国事故率与行车视距的关系曲线^[3]，分析可知事故率随视距的增

加而降低。当视距小于 100m 时，AR 随视距减小而显著增加；当视距大于 200m 时，AR 随视距增加而缓慢降低；当视距大于 600m 时，AR 基本不再变化。因此，100m 可以作为 AR 可容许极限点，200m 是 AR 变化率的转折点，在道路设计中应予以重视。

图 3.12 示出了道路交通事故相对数量与视距长度的关系^[17]。道路纵断面线形上的视距不足对道路交通事故数的影响比平面线形上的视距不足的影响更大。

根据上述分析可得到以下结论：

- 随着视距的增加，交通事故的危险性降低。
- 高事故率通常发生在视距不足 100m 的路段。
- 视距超过 200m 时，事故率随视距增加的降低幅度并不明显。
- 当视距超过 600m 时，事故率基本不再随视距的增加而变化。
- 视距不足与 AR 增加的负增长关系，在竖曲线路段更加明显。

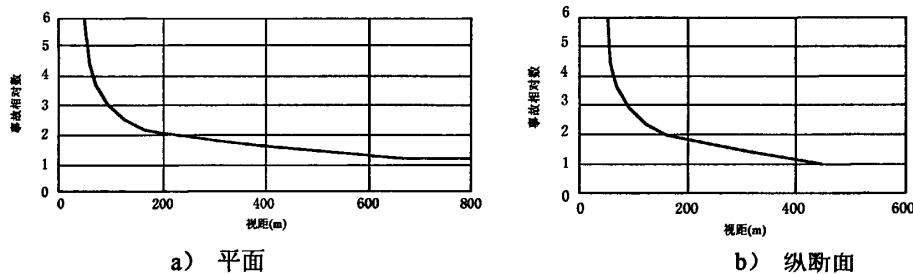


图 3.12 道路交通事故的相对数量与视距长度的关系

Fig3.12 Relations between road traffic accident's relative quantity and apparent distance length

3.4.5 道路线形的组合

道路线形由直线和各种曲线连接而成。在行车时，驾驶员需要观察了解前方路段的道路交通情况，以适应新的行车条件。由于驾驶员顺着直线或某种曲线扫视时，习惯于使视线平顺地向前，因此为保证行车安全，道路几何线形的组合应该自然流畅。如果道路几何线形组成部分的尺寸变化过大，驾驶员就会在驾驶汽车过程中缺乏足够的思想准备，容易造成交通事故。

此外，路外情况的变化或地形条件的突然变化也不利于行车安全。比如，曲线路段会影响驾驶员的视距，当夜晚行车在曲线段上时，光照距离也较直线段小，从而降低了行车的安全性。

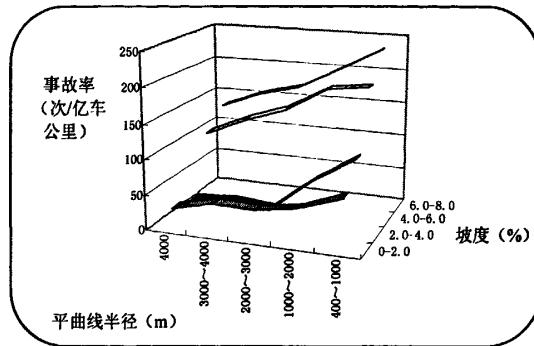


图 3.13 弯道与纵坡结合处的交通事故率

Fig3.13 The curve and the lengthwise grade unify the road section the traffic accident rate

陡坡与平曲线重合时，道路行车的安全性大大降低，图 3.13 为前苏联弯道与纵坡相组合路段的交通事故率变化图^[17]。

随着坡度的增大和平曲线半径的减小，交通事故率将逐渐增大。综上所述，可得出如下结论：

- 当平曲线半径大于 2000m、纵坡小于 2% 时，事故率最低，此时行车最安全。
- 当平曲线半径小于 2000m、纵坡仍然小于 2% 时，事故率随平曲线半径的减小而缓慢增加。
- 当平曲线半径大于 2000m、纵坡介于 2%~4% 之间时，事故率随平曲线半径的减小而仍然很低。
- 当平曲线半径小于 2000m、纵坡仍然介于 2%~4% 之间时，事故率 AR 迅速增加。
- 当纵坡大于 4% 时，使平曲线半径大于 2000m，事故率也很高，并且高于平曲线半径最小时的 AR 值，这也说明纵坡对行车安全的影响程度远远大于平曲线。
- 当纵坡大于 6% 时，无论平曲线半径是多大，事故率都很高，而且一直随纵坡增加呈直线上升趋势，说明在道路设计中应尽量避免陡坡的出现，尤其要避免陡坡与急弯组合的情况。

3.5 速度与事故的关系

3.5.1 设计车速、营运车速与限制车速

正确区分设计速度、运行速度、期望速度与限制车速的基本概念及相互之间的关系，是确定合理限速值的前提和依据^[1]。

1、设计速度。设计速度是公路设计时确定几何线形的基本要素，特别是在选择平、纵面设计参数、超高、加宽等方面都是考虑在最不利条件下的等级标准。它是在气候条件良好，车辆行驶只受公路本身条件影响时，特别是在受限制的路段，具有中等驾驶技术的人员能够安全且舒适驾驶车辆的速度。

根据美国最新版的“绿皮书”——《公路和街道几何设计政策》称，设计车速是一个选定的速度，用来确定设计道路的各种几何特征，并把“安全”这个词从上一版的定义中删去了，避免以为超过设计车速的速度是“不安全”的。

2、运行速度。是指车辆驾驶员根据实际道路情况自我选择的行驶车速。

3、期望速度。期望速度是车辆在不受或基本不受其他车辆约束的条件下，驾驶员所希望达到的最高“安全”车速。一般而言，期望车速与道路等级及交通状况、在行车辆的性能状况、驾驶员的性格、承运任务的急缓相关。当驾驶员感觉行驶过程中的运行速度低于期望车速一定数值时，便有改变其车速的意图。

4、限制速度。限制速度是从安全和运行速度的角度，限制公路某一路段的最高运行车速。

从四种速度概念定义可知，设计速度用于设计阶段确定道路各种指标的参数，驾驶员不能感知设计速度；运行速度及期望速度用以评价运营道路条件（如线形、环境、交通状况），是驾驶员对道路危险感觉的直接体现，是行车条件的实际反应；限制速度是平衡安全、效益、经济关系的管理手段。因此限制速度应建立在运行速度调查分析的基础上。

目前，现有高速公路限速方法，即选用设计速度作为限制速度实质上是对两种速度概念的混淆，我国不仅管理人员对两者的概念理解存在偏差，而且专业设计人员对两者的区别也不十分清晰。长期以来设计人员把设计速度或设计速度折减后的数值作为限速度数值，导致我国限速标志设置混乱局面。而形成此种局面根源在于我国缺乏对设计速度与运行速度的深入研究和明确的限速标志设置规定。

从交通工程学研究的限制车速角度看，限速是通过定点单车自由流车速的实地观测，作为限制车速的分析，取其85%定点单车自由流分位车速为限制车速。这种观测分析，实际中还要考虑气候、路面状况、路线位置状况、路侧安全设施、会车视距及事故多发地段等因素。因此，据我们的调查，大多数人认为当前高速公路及高等级公路中采用设计车速作为限制车速的标准是不当的，特别是在新开通的路段和车流量达不到运量期指标的路段，限制车速使用设计车速时，认为过于保守的人更多。对于这样一种状况，一旦确定路线的限制车速，大多数情况下，是无法更换或取代的。尽管道路设计者明知设计车速和限制车速的起点不同，且又互相联系，但因为在路线开通时，一般都用设计车速作为限速值，而各种安全

设施的使用，车流量的实际了解，各种其它因素的明确，再通过实地观测地定点单车自由流车速的 85% 分位车速作为修正限速值，实际难以办到。

正是由于上述原因，道路设计人员无法参与从统计的角度加以修正限制车速的工作。导致当前高速公路及高等级公路限速限值往往过低，造成许多驾驶员都反映在良好气候路况以及比较安全的情况下，即营运车速超过限制车速（使用设计车速）也不会造成不安全的情况下，仍然要用设计车速来确定限制车速的原因。

3.5.2 车速与交通事故的关系

大多数关于车速对事故影响的统计研究都认为，车速提高将导致事故数量上升。另外，这些研究达成这样一个共识，即车速对严重事故的影响要大于轻微事故。

交通调查显示，车速越高，发生事故的危险性也就越大。但是危险性与车速并不成线性关系。澳大利亚 RTA 研究速度与事故危险性的关系如下表 3.6 所示：

表 3.6 速度与危险性的关系

Table 3.6 Curved speed and risky relations

行车速度 (km/h)	相对事故危险性
60	1.00 (基数)
65	2.00
70	4.16
75	10.60
80	31.81
85	56.55

目前，关于车速和事故的量化关系研究如下：

下表 3.7 中的公式为不同类型事故的车速与事故数及伤亡人数的瑞典关系模型^[17]。式中，下标 L, S 和 F 分别代表一般事故、重大事故和特大事故；n 和 m 分别代表事故数量和伤亡人数；v 表示车速；下标 A 和 B 分别表示车速提高后和车速提高前。从模型中可以看出，车速对伤亡人数的影响明显大于对事故数量的影响，随着车速的提高，事故的严重性迅速上升。例如，如果初始速度为 80km/h，平均车速提高 5km/h，特大事故的数量将增加 27.4%，平均死亡人数将增加 30.6%。

表 3.7 不同类型事故的车速与事故数量及伤亡人数的关系模型

Table 3.7 Relational model of different type accident's vehicle speed
and accident quantity and casualties

事 故 数 量	一般事故	$n_{LA} = \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^2 n_{LB}$
	重大事故	$n_{SA} = \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^3 n_{SB}$
	特大事故	$n_{FA} = \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^4 n_{FB}$
伤 死 人 数	一般事故	$m_{LA} = \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^2 n_{LB} + \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^4 (m_{LB} - n_{LB})$
	重大事故	$m_{SA} = \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^3 n_{SB} + \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^6 (m_{SB} - n_{SB})$
	特大事故	$m_{FA} = \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^4 n_{FB} + \left(\frac{v_A}{v_B}\right)^8 (m_{FB} - n_{FB})$

3.5.3 车速离散性与事故的关系

Solomon 在 1964 年研究了车速和平均车速的差值与事故率的关系, 得出了一条 U 型曲线^[18], 表明速度无论是高于还是低于平均车速, 其车速差值越大, 事故率就会越高, 具体的关系模型为:

$$I = 10^{0.0006062\Delta v^2 - 0.006675\Delta v + 2.23} \quad (3.2)$$

式中: I —— 10 万车公里事故率 (次/10 万车公里);

Δv —— 速度离散度, 即断面的运行车速与平均运行车速之差 (km/h)。

1968 年, Cirillo 对高速公路和乡村公路白天、夜晚的情况涉及 2000 辆车进行了类似的调查, 验证了 Solomon 的结论, 完善了速度与碰撞率的 U 型曲线图 3.14, 得出事故率最低处的速度离散度稍大于 0km/h, 速度基本无变化; 在速度离散度为 0km/h 时, 事故发生与否取决于司机操作经验等因素; 同时, 速度离散度越大, 事故率越高的结论。

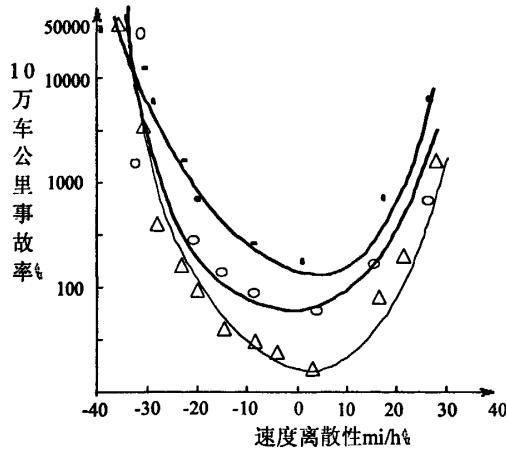


图 3.14 事故率与速度离散性关系图

Fig 3.14 The accident rate and the speed leave the divergence relational graph

1993 年, Monash 大学事故研究中心针对澳大利亚的公路现状模拟出速度梯度与事故率的近似函数关系进行了研究^[19]。结果表明, 车速与平均车速的差值越大, 事故率越高, 这与 Solomon 研究结果是一致的(图 3.15)。具体的关系模型为:

$$I = 500 + 0.8\Delta v^2 + 0.014\Delta v^3 \quad (3.3)$$

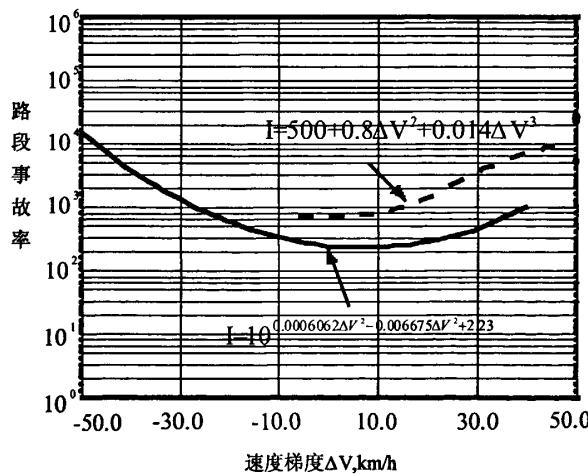


图 3.15 速度梯度与事故率的关系

Fig 3.15 Velocity gradient relationship with the accident rate

近似函数曲线如上图 3.15 所示, MUARC 分析显示, 当车辆运行车速大于路

段平均车速时, MUARC 模型与 SOLOMAN 模型结论基本一致, 当速度梯度越大, 交通事故率越高; 当车辆运行速度小于路段平均车速时, MUARC 模型认为事故率只有轻微得增加, 即运行车速低于路段平均车速时速度梯度与事故率无关。

LIU 和 POPOFF 曾对平均车速以及 85%位车速和 15%位车速之差与伤亡率的关系进行过研究, 结果表明, 平均车速每降低 1Km/h, 伤亡率将降低 7%。得出的两个线性模型为

$$\begin{aligned} CR &= 190.7\bar{v} - 17126.1 \\ CR &= -0.00298\bar{v} + 0.0405Diff - 3.366 \end{aligned} \quad (3.4)$$

式中: CR 为百万车公里伤亡率(次/百万车公里); \bar{v} 为平均车速(Km/h); $Diff$ 为 85%位车速与 15%位车速之差 (Km/h)。

英国交通研究实验室的 BURUGA A 研究出的 EURO 模型表明, 事故率和平均车速与超速行驶者的比例有很大关系, 平均车速和车速差异都会对事故率产生影响, 当平均车速为 60Km/h 时, 车速差异每降低 1Km/h, 事故率将降低 2.56%。具体的模型为:

$$\Delta \ln N = \frac{1.536}{\bar{v}} \Delta v \quad (3.5)$$

式中: N ——为年平均事故次数 (次/年);

\bar{v} ——平均运行车速, km/h;

Δv ——速度离散度, km/h。

几种模型结论总结如下表 3.8:

表 3.8 几种模型对照

Table 3.8 Several kind of model comparisons

	运行速度	速度梯度	交通事故率
Solomon 模型	无	$\Delta V > 0$	增加
		$\Delta V < 0$	增加
瑞典实验	降低	无	减少
MUARC 模型	无	$\Delta V > 0$	增加
		$\Delta V < 0$	基本无变化
EURO 模型	无	$\Delta V > 0$	增加
		$\Delta V < 0$	减少

裴玉龙等根据我国部分高速公路平均车速、车速标准离差与事故的统计数据

(见下表 3.9), 对平均车速、车速标准离差和亿车公里事故率进行了回归分析^[11]。

表 3.9 部分高速公路车速与事故统计数据

Table 3.9 Part highway vehicle speed and accident statistics data

高速公路	平均车速 (km/h)	车速标准离差 (km/h)	事故数量 (次/年)	交通量 (辆/年)	里程 (km)	亿车公里 事故率
成渝高速(重庆段)	87.61	17.16	206	7708800	114	23
石太高速	71.00	20.32	244	3972470	213.4	29
广佛高速	58.13	13.01	145	42223200	16	21
京石高速	93.00	26.63	1065	8719852	269.6	45
沪宁高速(上海段)	79.86	14.22	194	12511608	74.08	21
沈大高速	79.50	12.73	887	12334480	375	19
京津塘高速(北京段)	88.70	22.57	140	12859680	35	31

图 3.16 和 3.17 分别为平均车速与亿车公里事故率和车速标准离差与亿车公里事故率的关系曲线。

从图 3.16 中可以看出, 平均车速与事故率的关系为二项式关系 (式 3.6), 当平均车速为 70km/h 时, 事故率最低; 当平均车速超过 70km/h 时, 事故率开始随着车速的增加而上升, 而平均车速低于 70km/h 时, 事故率会随着车速的降低而上升。

$$AR = 0.0372\bar{v}^2 - 5.216\bar{v} + 201.71 \quad (3.6)$$

式中: AR ——亿车公里事故率 (次/亿车公里);
 \bar{v} ——平均车速 (km/h)。

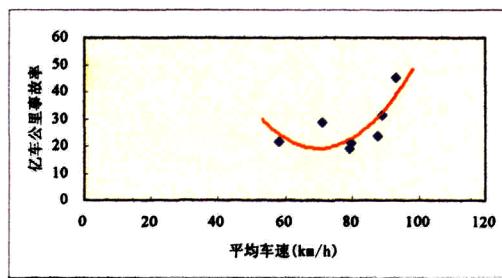


图 3.16 平均车速与亿车公里事故率关系曲线

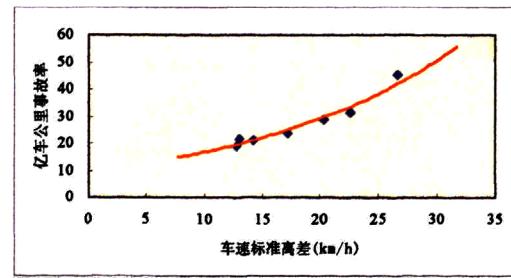


图 3.17 车速标准离差与亿车公里事故率关系曲线

从图 3.17 中可以看出, 车速的标准离差与事故率的关系为指数关系 (式 3.7)。事故率随着车速标准离差的增大而呈指数增长, 即车速分布得越离散, 事故率越高, 这与国外的研究结果是一致的。该模型为车速管理提供了有力的依据: 对车

辆进行高速和低速限制，而且使二者的差值尽可能小，降低车速分布的离散性，从而减少事故的发生率。

$$AR = 9.5839e^{0.0553\sigma} \quad (3.7)$$

式中： σ ——车速标准离差（km/h）。

模型表明，随着车速离散程度的提高，事故率将以指数增长率增长。同时，当车速标准差趋于零时，亿车公里事故率约为 10，说明事故的发生不只与车速有关，即使在公路上的所有车辆都以同一车速行驶，事故率也不可能降至零；另外，当车速标准差趋于无穷大时，事故率也不可能无休止的增长，公式的获得是以实际数据为基础的，车速标准差的大小均在 30Km/h 以下，故 0~30Km/h 可作为模型的使用范围。该模型为车速管理提供了理论依据，即应对车辆分别进行高速和低速限制，而且最高限速值与最低限速值的差应尽可能小，以降低车速分布的离散性，从而减少事故的发生率。

3.5.4 速度差值的选取

相邻路段的速度差值 ΔV 一般是由道路线性设计来控制的，也就是保证同一设计区段内，驾驶员能够采用连贯的驾驶方式行车，从而避免或减少由于出乎意料或判断失误造成操作错误，提高驾驶安全性。 ΔV 的表达式如下：

$$\Delta V = |V_{85i} - V_{85i-1}| \quad (3.8)$$

式中， V_{85i} ——调查断面上的 85% 位车速；

V_{85i-1} ——连续的前一断面的 85% 位车速。

根据安全要求，瑞士对 ΔV 标定值位两连续曲线路段或连续的曲线和直线路段之间，小客车运行车速之差不应超过 20km/h，尤其当路段运行车速小于 70km/h 时，车速变化要小于 10km/h；澳大利亚对 ΔV 的要求时连续路段的预测运行车速之差不宜超过 10km/h。国外部分国家的取值如下表所示：

国外相邻路段运行车速差 ΔV 取值如下：

表 3.10 相邻路段运行车速差 ΔV 取值

Table 3.10 Neighboring road section movement vehicle speed ΔV value

国家	美国	德国	瑞士	澳大利亚
ΔV (km/h)	16	10	20	10

本文建议我国新建高速公路相邻路段的速度限制差值 ΔV 不大于 20 km/h。

第四章 公路隧道交通特性分析

公路隧道与路段相比，其行车环境和交通流状态有。对交通流各种参数进行系统调查和分析，确定其变化规律，是进行公路隧道限速与安全研究的依据。

4.1 隧道行车环境特征

4.1.1 隧道环境条件

相对于高速公路普通路段而言，公路隧道属于半封闭环境，在行车舒适度以及交通管理等方面具有与洞外公路不同的特点，主要有以下几点：

① 隧道“黑洞效应”和“白洞现象”

在白天行车进入隧道时，由于隧道内外亮度差别比较大，从隧道外部看照明很不充分的隧道入口会看到黑洞（长隧道）以及黑框（短隧道）现象；出洞则相反，白天在隧道出口因外部亮度很高，出口看上去是个亮洞，视觉上出现眩光而倍感不适，即“白洞现象”。“黑洞效应”和“白洞现象”对安全行车极为不利，是导致隧道交通事故的一个重要因素。

② 环境照度

由于隧道内空间狭长，隧道内存在大量的汽车尾气，环境照度低（一般在5~100lx范围内），故行车的能见度较低。能见度与行车视距紧密联系，在汽车以较高速度行驶的条件下，如果前方出现异常情况，则极容易发生汽车追尾甚至连环相撞事故。

③ 环境噪声

由于隧道属于一个半封闭的环境，车辆发动机所产生的噪声无法进行有效的扩散，在隧道壁产生多次反射，行车舒适度显著下降，导致驾驶员的注意力下降，安全隐患随之增加。

④ 污染严重

能见度通常较低，加上入洞时的黑洞、黑框效应以及洞内的墙效应，隧道内常为事故多发段，并诱发各种各样的火灾，而且易发生二次事故，其交通事故后果严重，这些都致使隧道内空气污染严重，CO 和烟雾浓度大，影响驾驶人员的身体健康。

⑤ 交通组织困难

隧道通常为单向双洞，一般洞内间隔500米左右设置横通道，包括人行通道和汽车通道，提供发生事故时行人和车辆的紧急疏散，从发生事故的单洞转移至另一单洞。由于空间受到限制，加之事故发生后的紧张心理，场面一般比较混乱，

这都加剧了交通组织的难度。

表 4.1 公路隧道与公路路段交通环境对比表

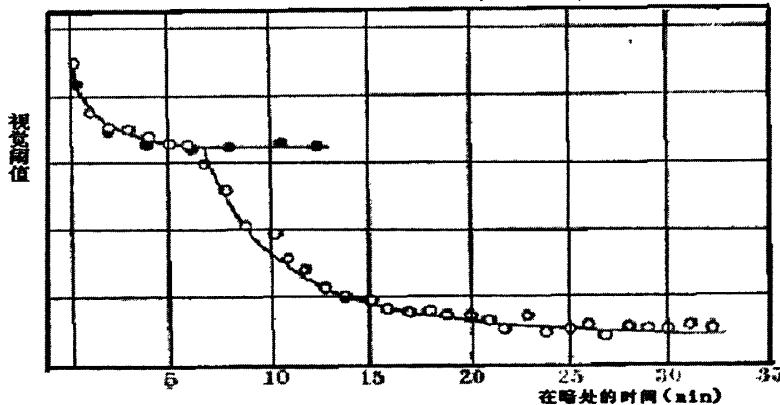
Table 4.1 traffic environment of Highway tunnel and road section comparative table

	长大隧道	洞外公路
路段	无交叉路口	有交叉口
视野	狭窄	开阔
光线	较暗、眩光效应、黑洞效应	由气候决定
空气	CO、废气等不易排除	由当地空气状况决定
阻塞车辆疏散方式	倒车、横通道、变线、车道反向	无横通道

4.1.2 隧道条件对行车安全的影响

1) 视觉暗适应的影响

车辆高速驶入隧道的过程中，驾驶员对光线的突变在短时间内很难适应，这个过程为光线暗适应（人从光亮的地方进入黑暗的地方时，开始视觉感受性很低，然后又逐渐提高，恢复了在暗处的视力的过程这个过程叫暗适应）。图 4-1 为在进入暗室后的不同时间，连续测定人的视觉阈值。



○ 表示用白光对全眼的测定结果 ● 表示用红光对中央凹测定的结果

图 4.1 暗适应关系

Fig 4.1 Dark adaptation relations

驾驶员在白天行车时，驶入黑暗的隧道便产生暗适应，造成人眼和心理的不适应。道路上的光线强度与隧道内的光线强度差异越大，适应过程中的视觉障碍越严重。由图 4.1 可知，暗适应过程一般需 7 分钟左右，完全适应约 25—30 分钟。当汽车运行在明暗急剧变化的道路上时，由于视觉感受性不能立即适应，容易发生视觉障碍，危及行车安全。在这种情况下，一般驾驶员会不经意的采取强制性

减速措施——紧急制动，紧急制动会引发车辆甩尾和侧翻。尽管隧道内设置了照明装置，但总不能完全解决隧道内、外光线明暗差异现象，因此，车辆低速行驶进入隧道能缓解暗适应带来的事故影响。

2) 隧道路面附着系数变化的影响

隧道路面因素的影响主要是路面附着系数的改变。由于隧道是相对封闭环境，尘埃和车辆排出的废气沉积在路面上，长期得不到雨水冲洗、阳光暴晒，降低了路面的附着系数。如云南省昆石高速公路（昆明至石林）清水沟隧道二号隧道内行车道附着系数晴天为 $0.50\sim0.45$ ，雨天为 $0.40\sim0.35$ ，大大低于水泥路面 $0.7\sim0.6$ 的正常附着系数。尤其在雨天，隧道外一般为潮湿沥青路面（路面较干净），隧道入口处一般为潮湿水泥路面（路面有沉积和污渍，车辆带入的雨水与沉积、油污混合），隧道内一般为干燥水泥路面。当高速行驶的车辆由潮湿沥青路面驶入干燥水泥过程中，路面附着系数发生急剧变化（变化过程：由潮湿沥青路过渡到潮湿油污水泥路面，然后又进入干燥油污水泥路面，路面附着系数不断改变），车辆进入隧道的行驶速度稍有变化（加速或减速），车辆就容易打滑失去控制，从而酿成车祸。

4.1.3 隧道事故特征分析

1) 隧道事故发生的季节分布

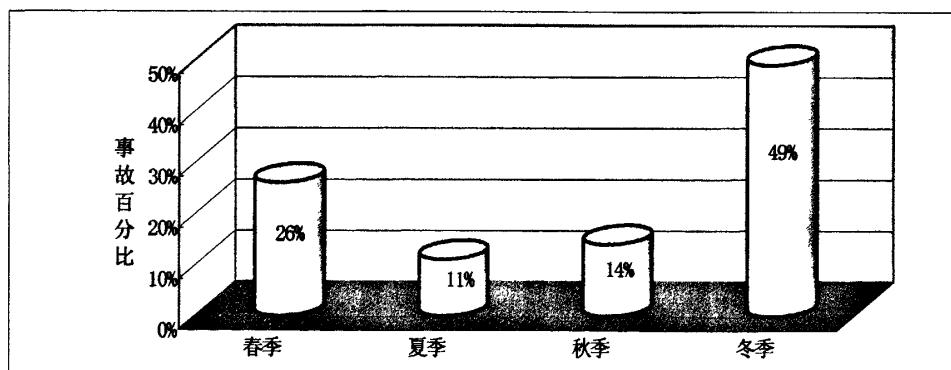


图 4.2 隧道事故季节分布规律统计

Fig4.2 Seasonal distribution of the tunnel accident

2) 碰撞方式分布

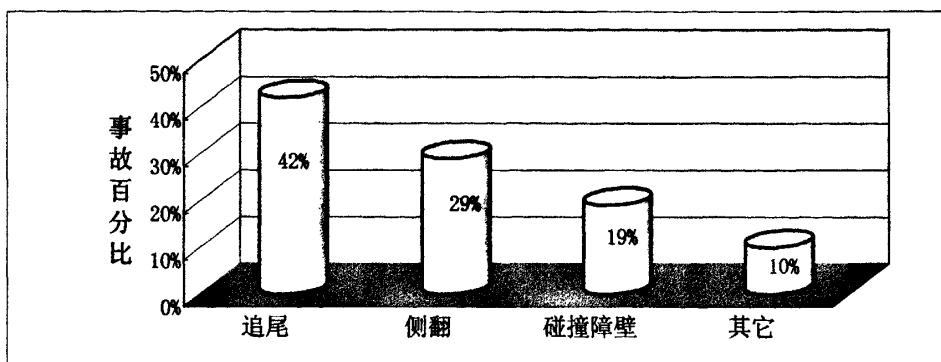


图 4.3 碰撞方式分布统计

Fig4.3 Distribution of statistical Collision way

3) 事故发生原因

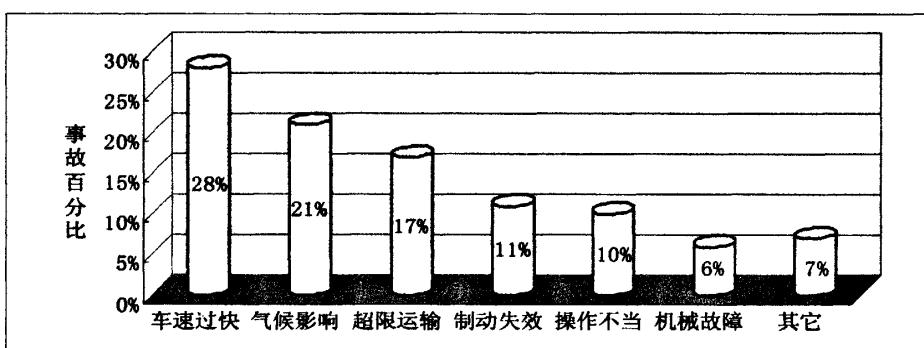


图 4.4 隧道事故原因分布统计

Fig4.4 The cause of the accident statistics of the tunnel

4) 隧道事故纵向分布

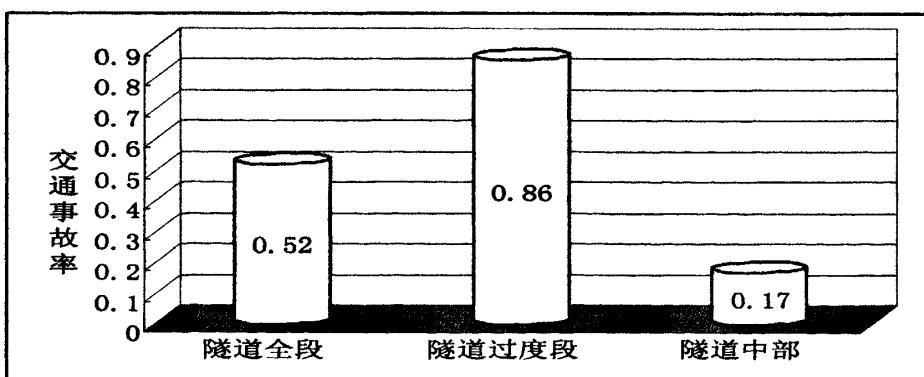


图 4.5 隧道交通事故率纵向分布统计

Fig4.5 Vertical distribution of the tunnel accident rate statistics

- 注:① 事故率=受伤人数/年百万车公里;
② 隧道全段包括隧道和隧道外 100m 区段;
③ 过渡区段为出入口隧道内 200m。

5) 隧道事故特征分析

a) 在冬、春季隧道交通事故较多。西南地区冬季山地结冰现象严重, 春季雨水较多, 路面湿滑, 恶劣的天气环境严重的影响了车辆的正常行驶, 因此, 增加道路附着系数是很重要的。

b) 隧道交通事故主要是追尾居多, 而且连环追尾事故占一定比例。这说明了, 改变隧道内行车视距至关重要, 从中获取的另一个潜在信息是, 失控车辆动能极大, 往往会发生后续碰撞, 增加了事故的损害程度。

c) 隧道交通事故诸多原因中车速快占很大的比重, 严格的控制车速能很大程度地降低事故发生率。

d) 隧道交通事故发生的地点既非均匀分布, 也非随机分布。而是主要集中在长大隧道进出口 200-400 米的路段范围内以及特长隧道的中部。主要原因在于: 车辆刚刚进入隧道时, 路面条件和道路环境的瞬时改变造成车辆的侧滑; 在明暗交替变化的过程中, 明暗度变化太大, 而变化过程时间太短, 驾驶员的视觉不能立即适应, 易引发各种交通事故; 隧道内光线差、空间狭窄等特点的存在, 使驾驶员产生压抑心理, 并产生急于离开隧道的心理, 因此超速行驶。

4.2 公路隧道交通流特性

公路隧道交通流特性是通过交通量、车速、车流密度、车头时距、通行能力、延误时间等交通参数来描述的, 这些参数之间的定性和定量的数据关系反映了交通流特性。对交通流各种参数进行系统调查和分析, 确定其变化规律, 是研究公路隧道交通流特性的依据。

4.2.1 公路隧道车辆行驶特性

鉴于公路隧道特殊的构造和环境, 车辆在隧道内行驶与在开阔的公路上行驶相比有很大的区别^[20]。

1) 在正常行驶条件下, 所有车辆必须各行其道, 不得变线。除非有事故车辆占道, 并有信号指令方可变线。在隧道内一般没有其他车道可用, 所以在事发点上游易发生拥挤现象或造成堵塞。

2) 隧道内禁止蛇行和超车, 为此隧道内一般分道标志线为实线。
3) 隧道内不得停车。如车辆发生故障, 行驶的车辆不得不停车时, 可以停在划定的紧急停车段内。

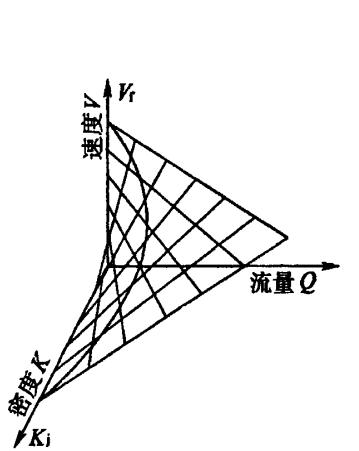
4.2.2 交通流基本理论

1) 三参数基本关系^[21]

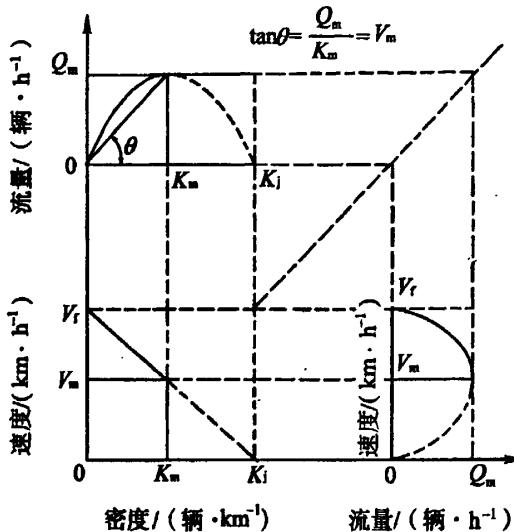
$$Q = V_s K \quad (4.1)$$

式中: $\frac{Q}{V_s}$ ——平均流量 (辆/h);
 V_s ——区间平均车速;
 K ——平均密度 (辆/km)。

流量、密度、速度三者之间的关系如下图:



$Q = V \cdot K$ 交通流模型曲线图



$Q - K, V - Q, V - K$ 关系曲线图

图 4.6 交通流三大参数之间的关系

Fig4.6 The relations between the three parameters of Traffic flow

2) 车流波动理论^[21]

车流中两种不同密度部分的分界面经过一辆辆车向车队后部传播的现象，称为车流的波动性。此车流波动沿道路移动的速度，称为波速。

低密度状态向高密度状态转变的分界，它所体现的车流波称为集结波；高密度状态向低密度状态转变的分界，它所体现的车流波称为疏散波，两种不同的车流波统称为集散波。波速公式为：

$$W = \frac{Q_1 - Q_2}{K_1 - K_2} \quad (4.2)$$

式中： W 为集散波的波速；
 Q_1 和 Q_2 ——前后两种车流状态的流量；
 K_1 和 K_2 ——前后两种车流状态的密度。

如果车流前后两行驶状态的流量和密度非常相近，则有：

$$W = \frac{dQ}{dk} \quad (4.3)$$

这是微弱波的波速公式，即车流中传播小紊流的速度公式。

集散波总是从前车向后车传播的，把单位时间内集散波所掠过的车辆数称为波流量。波流量是相对于移动的波界面来计算的，其公式如下：

$$Q_w = \frac{V_2 - V_1}{\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1}} \quad (4.4)$$

式中： Q_w ——车流波 W 的波流量；

V_1 、 V_2 ——前后两种车流状态的流量；

K_1 、 K_2 ——前后两种车流状态的密度。

上述交通流理论同样适用于公路隧道，是分析公路隧道交通流状态的基础。

4.2.3 交通流参数分析

1) 车速分布及空间变化

根据重庆中梁山隧道车速调查数据，如下表：

表 4.2 重庆中梁山隧道不同位置地点车速及方差

Tab4.2 In Chongqing Zhongliangshan tunnel different locations and sites speed variance

隧道进口处		隧道内		隧道出口	
平均车速	标准差	平均车速	标准差	平均车速	标准差
52.87	12.15	56.07	7.94	64.27	10.31

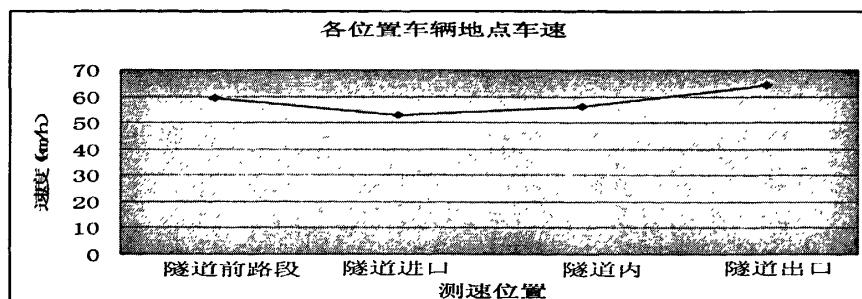


图 4.7 隧道地点车速空间变化图

Fig4.7 Tunnel place vehicle speed change chart

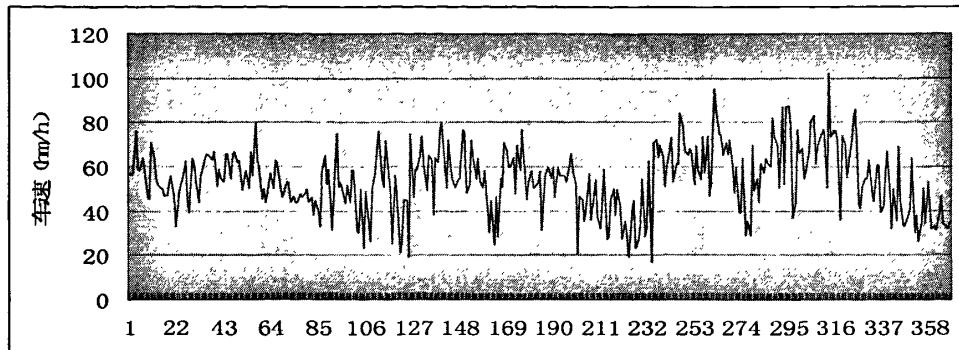


图 4.8 隧道进口车速分布

Fig4.8 The tunnel imports the vehicle speed distribution

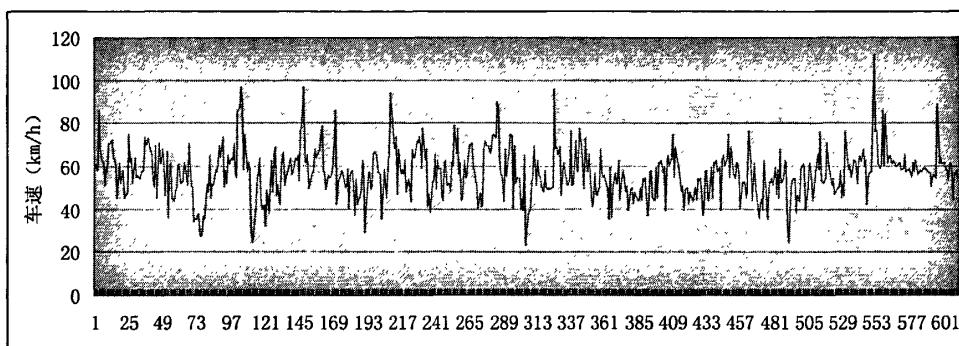


图 4.9 隧道内车速分布

Fig4.9 Speed distribution in the tunnel

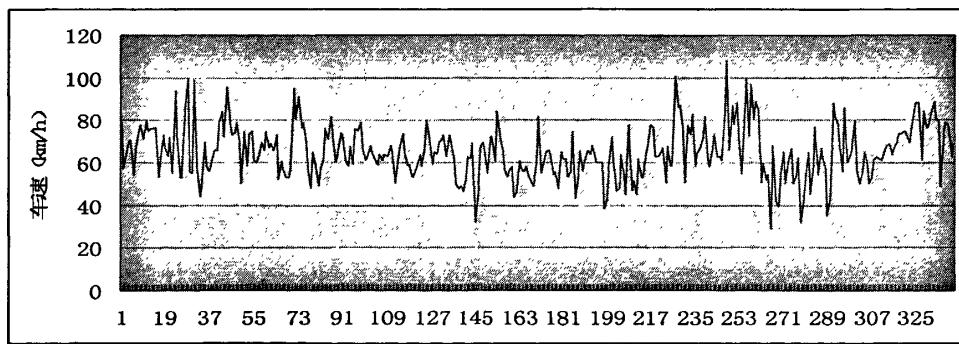


图 4.10 隧道出口车速分布

Fig4.10 Tunnel export the vehicle speed distribution

从上面可以看出车流在进入隧道时减速行驶，在驶出隧道时加速行驶，车辆在通过隧道时车速由“高—低—高”发生变化。隧道入口段为上坡路段，货车受影响严重，小车主要是受慢车和隧道环境的影响，故车速较低；出口段为下坡路

段，加上驾驶员驶出隧道的逃逸心理，车速较高。车速分布在出入口处方差较大、在隧道内较小。隧道内不准越线行驶，快车主要受慢车的制约和隧道特殊环境的影响，当交通量较大时，自由行驶的概率较小，基本成跟驰状态，故车速均值与方差都较小。车辆在进入隧道时车速降低，交通量基本不变，因此隧道的车流密度及占有率必然增大。

2) 交通量时间分布

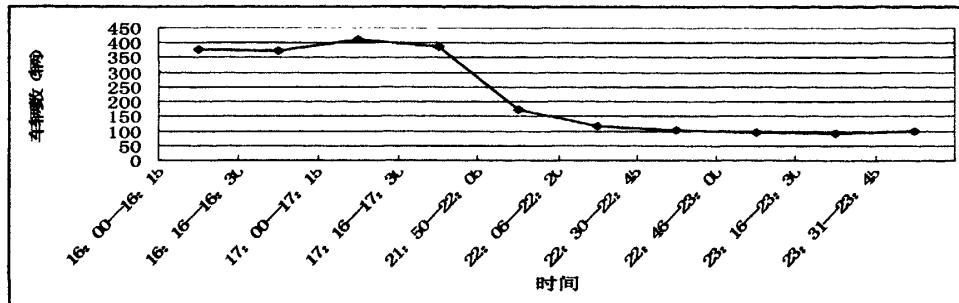


图 4.11 交通量随时间变化图

Fig4.11 Volume of traffic along with time change chart

如图 4.11，下午 17: 00—17: 15 时刻扩大高峰小时交通量为 1648 辆/时，此时的交通流车辆的自由行驶度不高，受制约较严重，此时易发生追尾或侧撞事故。

4.2.4 隧道交通稳定性分析

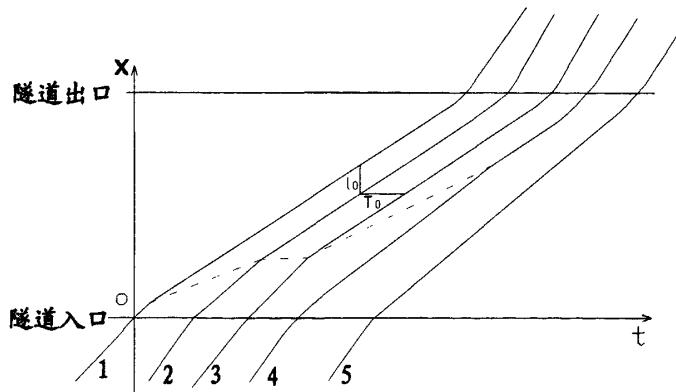


图 4.12 隧道交通稳定性分析

Fig4.12 Stability analysis of tunnel traffic

对于高速公路隧道，一般不允许变更车道和超车。前车 1 以较低速度驶入隧道后，车 2 在虚线处受到车 1 影响以车 1 速度跟驰行驶，此时二者间距为车 2 驾

驶员判断的安全间距。由于车速分布的不均匀性和车辆到达的随机性，各车延误很难准确计算。总体来说，行车延误随隧道长度的增加而增加。根据驾驶员的行车心理可知，车2驾驶员在受到前车速度制约时会产生压抑感。而这种压抑感达到一定程度，驾驶员即产生换车道需求。

1) 换车道概率

这里引入跟车容忍度的概念。跟车容忍度定义为跟车驾驶员承受前导车行驶制约的最大限度。跟车容忍度与两车期望车速差值 ΔV 和跟车时间T有关。

$$\sigma = \Delta V \cdot T \quad (4.5)$$

式中： σ ——跟车容忍度；

ΔV ——后车期望车速与前车行驶车速之差；

T——跟车时间。

跟车容忍度 σ 不是固定值，它由驾驶员的生理心理情况、心情好坏、行车环境等因素决定的。

车速差值 ΔV 与跟车时间T成反比。隧道内由于行驶环境的特殊性，影响驾驶员对路况和车间距的判断，超车是非常危险的。当跟驰状态超过后车驾驶员容忍度后，即产生换车道需求，伺机超车。

虽然隧道内禁止越线行驶，当车速分布方差较大或隧道过长时，驾驶员违规驾驶换车道概率较大，易发生交通事故。

2) 安全间距

当后车减速接近慢车时，两车间距在逐步缩小，由于驾驶员相对车速判断上的误差，两车间距将小于安全间距，驾驶员意识到后会再减速保持车距，此时两车间距会增加，大于安全间距。驾驶员就是不断调整车速来保持速度的一致性。此过程中两车间距如图所示，在安全间距上下震荡，趋于稳定。当多个车辆成跟驰状态时，小紊乱在车流中传播，此时车流处于不稳定状态，易发生事故。

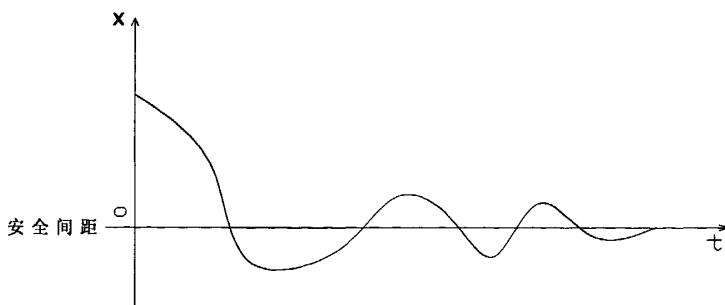


图 4.13 跟驰车距在安全车距附近震荡

Fig4.13 Vehicles' distance Shakes nearby the security distance between vehicles

4.2.5 尾撞概率分析

交通流中在一定时间内到达的车辆数目有其随机性，也有规律性，研究表明，这种规律属离散型分布，统计表明，泊松分布适用于低流量无干扰的车流状态，二项分布适用于交通比较拥挤，车辆行驶自由度不大，较为均匀通过的交通流，负二项分布适用于车辆到达量波动较大的交通流，对于公路隧道，交通流一般服从泊松分布或二项分布，在洞内关闭一段时间车辆形成排队然后又放行时，交通流可能服从负二项分布。当隧道内交通量较大时，一般隧道车道分隔线为黄实线，即隧道内禁止超车。因此，这里仅研究当交通量较小或行驶自由度较大时的情况。此时车流是随机的^[22]。

1) 当交通量较小或行驶自由度较大时，车辆数到达属于泊松分布：

泊松分布

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}, \quad x=0, 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

$$P(0) = e^{-\lambda t}$$

$$P(1) = \lambda t P(0)$$

$$P(2) = \lambda t P(1)/2$$

其中， $P(x)$ ——t 期间内到达 x 辆车的概率；

λ ——单位时间内到达车辆数的车辆值 (辆/s)；

t——每个计数周期的持续时间 (s)。

从交通安全考虑，主要是在一定的置信度下，车辆不会发生尾撞与超车引起侧撞（超车距离不够，前导车减速或刹车，来不及回到右车道）。因此，车辆的到达时间间隔以小于某一最小安全间隔 T，其可按下式计算

$$T = t_n + \frac{t_{i2}}{2} + \frac{3.6V_i}{254(\Phi \pm i)} - \frac{3.6V_{i-1}^2}{254(\Phi \pm i)V_i} + \frac{3.6l_i}{V_i} \quad (4.7)$$

由于司机的反应时间为 (0.3~1.0) 秒，制动器作用时间为 (0.2~0.9) 秒，若略去 t_{i2} ，则

$$t_n + \frac{t_{i2}}{2} = (0.4 \sim 1.45) \text{ 秒} \quad (4.8)$$

当 $V_i = V_{i-1}$ 时，

$$T = t_n + \frac{t_{i2}}{2} + \frac{3.6}{V_i} l_i \quad (4.9)$$

取 $l_i = 5$ 米，这时不同速度时的 T 如下表所示

表 4.3 不同速度时的 T 值

Table4.3 The value of T when different speeds

V	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
V_t/V	1.8	1.2	1.9	0.72	0.6	0.51	0.45	0.4	0.36	0.33	0.3	0.28	0.26
T	2.2- 3.25	1.6- 2.65	1.3- 2.35	1.12- 2.17	1- 2.05	0.91- 1.96	0.85- 1.90	0.8- 1.85	0.76- 1.81	0.73- 1.81	0.7- 1.75	0.68- 1.73	0.66- 1.71

对于公路隧道，正常交通流车速应为（30~60）km/h，故 T 应为（0.7~2.05）秒，考虑到小车通行能力为 1800 辆/小时，即平均车头时距为 2 秒， T 可取 2 秒，其相当于 2.05 的 98% 是比较保守的，若考虑到在计算 T 时假定了前导车与跟踪车车速相同，而不利的情况是跟踪车车速大于前导车速，故更保守的考虑 T 可取 2.5 秒。

取置信度为 0.5，即在 Δt 时间内，95% 以上不会有二辆以上车同时到达，这时，不同 Δt 对应的交通量如下表所示。

表 4.4 不同 Δt 对应的交通量Fig4.4 Different Δt corresponding volume of traffic

Δt (秒)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
交通量(辆/小时)	925	700	550	475	400

对于公路隧道，当交通量小于 550 辆/时，基本不会发生尾撞事件。

4.3 基于安全车速的交通流参数关系

由交通流理论可知：交通流的速度是其他交通流状态变量(例如交通量、密度、车头时距、占有率)的函数。根据这些变量的函数关系，加上道路、交通、气象等条件对交通流运行安全和效率的约束条件，可建立交通流速度控制的数学模型。

4.3.1 车流间影响系数

在纯车流和理想状态条件下，车流以最佳期望车速前进，各车由于车速相近，各车道车流间影响较小。在混合车流条件下，由于车身尺寸、性能和速度的差异，在低、中密度时，若车流中前车速度小于后车速度，后车总会寻找机会超越前车；若车流中前车速度大于后车速度，两车间距将拉大，车辆间影响也就较小，但是这两种情况在不断更替变化。在中、高密度时，超车的机会减少，但车流间影响

仍然存在。

定义车流中车辆间相对运动导致的车流相互影响程度为车流间影响系数，经过分析，车流间影响系数可用下式表示：

$$\tau = \eta \Delta v \frac{h}{h - d_{\min}} \quad (4.10)$$

式中： η ——车流相互影响系数，与车型比例和动力性能有关。车型混合率越高， η 越大，即混合率越高，车辆之间相互干扰增大，即 η 越大。图 4.14 显示了小车比例与 η 的关系。其中车流混合率是指小车数与大车数之比；

Δv ——车辆的速度方差；

h ——车头间距；

d_{\min} ——跟车视距，即车辆之间为保证安全行驶的最短安全距离。

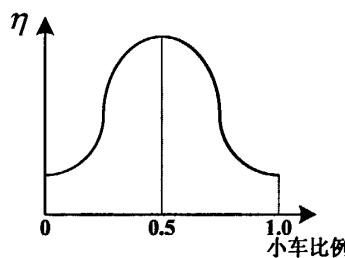


图 4.14 小车比例与 η 的相互关系

Fig 4.14 Relationship between car proportion and η

车流间影响系数的物理意义为：车型混合率越高，车辆间影响越大；速度方差越大，车辆间影响越大；车辆间间距越大，车辆间影响越大；反之亦然。

4.3.2 安全车距分析

混合车流中，车头时距与各自成对的车辆有关。车头间距在空间上表现为前车保险杠至后车保险杠之间的距离。为保证行驶安全的最小车头间距可表示如下：

$$l = l_0 + l_{\text{安}} + l_{\text{反}} + l_{\text{制后}} - l_{\text{制前}} \quad (4.11)$$

式中： l ——最小安全车头间距 (m)；

l_0 ——前车车长 (m)；

$l_{\text{安}}$ ——两车间安全距离 (m)；

$l_{\text{反}}$ ——从后车司机发现前车制动开始至后车制动生效，后车所走的距离 (m)， $l_{\text{反}} = v \times t_0$ ，其中 t_0 从后车司机发现前车制动开始至后车制动生效的时间；

$l_{\text{制后}}$ —— 后车制动距离, $l_{\text{制后}} = \frac{v^2}{2ga}$, 其中 a 为后车制动力系数, 与车辆性能有关;

$l_{\text{制前}}$ —— 前车制动距离, $l_{\text{制前}} = \frac{v^2}{2gb}$, 其中 b 为前车制动力系数, 与车辆性能有关。

理论分析中认为, 前后车组成车队连续运行时, 前、后车车速趋于一致, 即 $l_{\text{制后}} = l_{\text{制前}}$ 。而经实际观测及深入分析发现, 前后车的速度常不一致, 后车在跟随前车的过程中速度不是一个定值, 而是在前车速度左右波动。如果长时间的高于前车, 后车则会加速超越; 若长时间的低于前车, 则会逐渐落后而消散。另外, 安全距离的大小受车辆的性能、行驶的车速、司机的驾驶水平以及心理素质等因素的影响, 在实际运行时, 司机无法在高速运行的情况下, 通过制动将车辆准确制动在一定安全距离以外, 而且随着速度的提高, 司机的判断力也会下降, 对安全距离的估计会更加不足, 从而导致制动后的安全距离超过一定值。故假定此过程包含司机主观判断, 表现为司机反应时间及制动生效时间。车辆的到达时间间隔以小于某一最小安全间隔 T , 其可按下式计算

$$T = t_n + \frac{t_{i2}}{2} + \frac{3.6V_i}{254(\Phi \pm i)} - \frac{3.6V_{i-1}^2}{254(\Phi \pm i)V_i} + \frac{3.6l_i}{V_i} \quad (4.12)$$

由于司机的反应时间为 (0.3~1.0) 秒, 制动器作用时间为 (0.2~0.9) 秒, 若略去 t_{i2} , 则

$$t_n + \frac{t_{i2}}{2} = (0.4 \sim 1.45) \text{ 秒} \quad (4.13)$$

当 $V_i = V_{i-1}$ 时,

$$T = t_n + \frac{t_{i2}}{2} + \frac{3.6}{V_i} l_i \quad (4.14)$$

取 $l_i = 5$ 米, 这时不同速度时的 T 如下表所示

表 4.5 不同速度时的安全时距

Table 4.5 Different speed from the safety of time Distance

V	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Vi/V	1.8	1.2	1.9	0.72	0.6	0.51	0.45	0.4	0.36	0.33	0.3	0.28	0.26
T	2.2- 3.25	1.6- 2.65	1.3- 2.35	1.12- 2.17	1- 2.05	0.91- 1.96	0.85- 1.90	0.8- 1.85	0.76- 1.81	0.73- 1.81	0.7- 1.75	0.68- 1.73	0.66- 1.71

车头间距、车头时距及速度三者之间的关系:

$$l = \frac{V}{3.6} T \quad (4.15)$$

4.3.3 理想通行能力

在实际中, 通行能力与一定的公路和交通条件相联系的, 在混合车流条件下, 车型比例、行车速度都是影响通行能力的重要因素。

假设在小车比例 α 一定条件下, 小车跟随小车最小车头时距为 t_{11} , 小车跟随大车最小车头时距为 t_{10} , 大车跟随小车最小车头时距为 t_{01} , 大车跟随大车最小车头时距为 t_{00} , 各种跟车概率为:

$$p_{ij} = \begin{cases} \alpha \times \alpha & i=1, j=1 \\ \alpha \times (1-\alpha) & i=1, j=0 \\ \alpha \times (1-\alpha) & i=0, j=1 \\ (1-\alpha) \times (1-\alpha) & i=0, j=0 \end{cases} \quad (4.16)$$

则车流的平均车头时距为:

$$T = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} (p_{ij} \times t_{ij}) \quad (4.17)$$

则在小车比例 α 一定的情况下, 混合车流的理想通行能力为:

$$Q_{理} = \frac{3600}{T} = \frac{3600}{t_{11} \cdot \alpha^2 + (t_{10} + t_{01}) \cdot \alpha(1-\alpha) + t_{00} \cdot (1-\alpha)^2} \quad (4.18)$$

式中, t_{ij} 由式 (4.12) 计算分析获得。

4.3.4 交通流参数关系

在路段上连续行驶的车辆, 如果行驶过程中受前车影响, 其将根据影响程度的大小选择超车, 其若想超车必然需要前方连续车流中有可插入的车位。在连续车流中, 由于通行能力的不饱和导致车流中有空隙, 即为可插入的车位, 因此, 在一个时刻, 车流超车度可定义为:

$$N = (Q_{理} - Q) \times \tau \quad (4.19)$$

其中: τ ——为车流间的影响系数。

为了保证行车安全, 在流量和车型比例一定的条件下, 经前述分析, 超车辆数与车速值有关, 需求出车流超车度最大情况下的临界速度做为整个车流的限速值, 即可保证车流安全行驶。

经前述分析, 车流超车度与各个参数的关系为:

$$N = (Q_{理} - Q) \times \eta \times \Delta v \times \frac{h}{h - d_{min}} \quad (4.20)$$

通过对交通事故率与车速标准差关系研究知，其成指数关系，则可假设：

$$gN = (\Delta v)^n, \text{ 其中 } g \text{ 为常数, } n > 1 \quad (4.21)$$

结合式 (4.20) 和 (4.21) 可得：

$$N^{1/n} = (Q_{理} - Q) \times \eta \times g \times \frac{h}{h - d_{min}} = f(Q) \quad (4.22)$$

当车流超车度 N 取最大值时的车流临界车速即为车流平稳安全行驶的车速，则只要求出临界车速时的流量与速度的关系，限速在临界车速之下即可保证车流在最佳安全状态行驶。

设车流速度 v 、流量 Q 、密度 k 、阻塞密度 k_f 、自由流速 v_f ，则根据格林希尔治交通流模型： $Q = k_f(v - \frac{v^2}{v_f})$, $v = v_f(1 - \frac{k}{k_f})$ 计算得：

$$Q = v_f(k - \frac{k^2}{v_f}) \quad (4.23)$$

由交通流参数关系有： $h = \frac{1}{k}$, $d_{min} = \frac{1}{k_f}$ ，代入式 (4.22) 并对流量 Q 求导的：

$$f'(Q) = \eta \times g \times k_f \times \frac{k - k_f + (Q_{理} - Q) \times k'}{(k_f - k)^2} \quad (4.24)$$

其中 k' 为 k 对 Q 的导数，可通过式 (4.23) 获得：

$$k' = \frac{k_f}{v_f(k_f - 2k)} \quad (4.25)$$

令 $f'(Q) = 0$ 时，可得 N 取极值时有：

$$k - k_f + \frac{(Q_{理} - Q)k_f}{v_f(k_f - 2k)} = 0 \quad (4.26)$$

解 (4.23) 式得： $k = \frac{1}{2}(k_f - \sqrt{k_f^2 - 4k_f Q / v_f})$ ，带入上式有：

$$\frac{(\varrho_{理}-\varrho)k_f}{v_f \sqrt{k_f^2 - 4k_f Q/v_f}} = \frac{1}{2} (k_f + \sqrt{k_f^2 - 4k_f Q/v_f}) \quad (4.27)$$

综上所述, 车流安全车速 v 、小车比例 α 、车流流量 Q 三大参数必满足式(4.12)、(4.18)、(4.27), 经化简有三大参数关系式为:

$$\frac{3600}{(t' + \frac{2l_{小}}{v})\alpha^2 + 2(t' + \frac{l_{小} + l_{大}}{v})\alpha(1-\alpha) + (t' + \frac{2l_{大}}{v})(1-\alpha)^2} = \frac{v_f}{2} \cdot (k_f + \sqrt{k_f^2 - 4k_f Q/v_f} - \frac{4Q}{v_f}) + Q \quad (4.28)$$

式中: t' ——为考虑车辆的性能、行驶的车速、司机的驾驶水平以及心理素质条件下, 保证司机足够安全的反应时间;

α ——小车在车流中所占比例;

$l_{小}$ ——小车车长 (m);

$l_{大}$ ——大车车长 (m);

k_f ——车流阻塞密度;

v_f ——车流自由流速。

4.4 隧道组合形式的影响

4.4.1 独立隧道

独立隧道是指隧道出入口衔接皆为平直路段。隧道限速区段包括隧道出入口前后 150 米范围、隧道过渡段和隧道中部。影响隧道限速的主要因素有: 天气、可见度 (VI)、照度、隧道坡度、长度、平曲线、路面附着系数、交通特征 (车流量、交通组成等)、监控管理水平、当地经济水平和产业结构等。

高速公路隧道出入口为隧道事故多发点, 分析高速公路隧道洞口特征及安全隐患。

1) 高速公路隧道洞口特征

➤ 隧道的出入口路段线型选择及道路走向多为弯道、坡道路段。

在西南地区, 特殊的地理条件制约着道路线型及道路走向的选择, 隧道的出入口多为弯道、坡道路段, 有的甚至是多弯道、长下坡路段。

➤ 隧道内外路面附着系数存在差异

有些隧道为两种不同材料路面的过渡区域 (洞外多为沥青路面, 洞内为水泥路面, 利于防火), 或者由于隧道是相对封闭环境, 尘埃和车辆排出的废气沉积在路面上, 长期得不到雨水冲洗、阳光暴晒, 降低了路面的附着系数。因此, 隧道内外路面附着系数存在差异。

- 隧道出入口积水问题较难解决。

隧道积水、排水是隧道工程中比较棘手的问题，由于地形、水文的影响，雨天隧道入口处积水较多。因此，积水、排水问题的解决是一个重要的工作。

2) 高速公路隧道洞口事故统计分析

表 4.6 与隧道洞口有关的交通事故影响因素分析统计表

Table 4.6 With the tunnel entrance the traffic accident impact analysis tables

年份	隧道洞口交通 事故(起)	与隧道洞口平纵线形有关		与隧道洞口形状、路面状况有关		与隧道洞口亮度变化有关		与驾驶员有关				车辆制动失效		与其它因素有关	
		(起)	(%)	(起)	(%)	(起)	(%)	(起)	(%)	(起)	(%)	(起)	(%)	(起)	(%)
2002	38	4	11	8	21	10	29	12	32	6	16	5	13	8	21
2003	47	5	11	10	21	14	30	16	34	7	15	5	11	12	26
2004	58	7	12	15	26	16	28	19	33	7	12	6	10	15	26
平均值			11		23		29		33		14		11		24

- 事故集中在长大隧道内，1000m 以下的隧道少有事故发生；
- 事故在隧道内发生的地点不是均匀分布也不是随机分布，而是集中在隧道入口处 200~400m 路段范围内。主要原因在于：车辆刚刚进入隧道时，由于路面工况以及环境状况的突然改变，可能在瞬间造成车辆侧滑；同时驾驶员的视力尚处于弱视阶段；
- 事故集中发生在水泥混凝土路面构造的隧道中，而沥青路面构造的隧道内事故发生数量明显偏少。

3) 隧道洞口段环境对驾驶员心理的影响

驾驶员对隧道洞口段的不适应性。隧道洞口段是隧道交通事故发生的集中路段，也是驾驶员心理变化最显著、最快速的路段。在该路段驾驶员的视觉和心理上都存在不同程度的不适应现象。这种不适应现象主要表现在以下三个方面：

- 隧道洞口内外亮度不一致(暗适应)；
- 隧道内外限速不一致；
- 隧道内外路面构造不一致。

a) 隧道入口暗适应对驾驶员心理的影响

车辆高速驶入隧道的过程中，由于隧道内外亮度的显著性差异，驾驶员视网膜的光感受性会非常迅速地提高，这一过程就是暗适应。在这种情况下，一般驾驶员会不经意的采取强制性减速措施—紧急制动，紧急制动常常会引起自驾车辆的侧翻和紧跟其后的车辆发生追尾事故。

暗适应对驾驶员心理的影响，主要表现在由于外界亮度变化迅速而驾驶员心理变化相对滞后所带来的不适应现象。减小暗适应对驾驶员心理影响的方案主要有：

- 降低行车速度，使外界亮度变化减慢，减小外界亮度变化与驾驶员心理变化之间的落差，从而减小暗适应的影响作用；
- 通过提高暗适应速度，从而提高驾驶员的心理变化速度，同样能起到异曲同工的作用。

b) 隧道洞身与出口段的逃逸心理

大量隧道交通事故的统计资料显示，隧道交通事故不仅仅发生在隧道的进口段，在隧道洞身以及出口段也有交通事故的发生，而且比例不容忽视。从心理学角度来看，对像隧道这样的相对密闭的空间，易使人产生压抑心理和恐惧心理。

隧道空间相对密闭，使驾驶员的视野控制在一个管状空间内，再加上隧道内环境极其单调，缺乏必要的注视点，就更易引起驾驶员的视觉疲劳，这对行车安全带来了很大的隐患。而当驾驶员的这种视野连贯性遭到外界环境阻隔，无论从生理上，还是从心理上都需要一个视野补偿。这种视野连贯性如果不能及时在隧道内得到补偿，驾驶员会很自然地将目标锁定在隧道外，这样就容易产生逃逸心理，并不自觉地提高车速以满足视野的连贯性。因此，在隧道出口段，驾驶员往往加速行驶，车速较高，如果出口处线形不好，即容易发生交通事故。

4.4.2 隧道群

公路隧道群是指在某路段上有 2 个或 2 个以上隧道。隧道群包括连续隧道和毗邻隧道。“规范”没考虑其它因素，从照明设计的角度，规定 2 座隧道间的行驶时间按计算行车速度考虑小于 30s 即为连续隧道；对于间距更小的毗邻隧道没有进行定义^[23]。

从设计的角度来讲，对连续隧道和毗邻隧道的定义，应该从通风、照明、交通控制 3 个方面综合考虑：通风方面，主要考虑上游隧道的污风是否串流到下游隧道，不发生串流的间距一般为 150m 左右；交通控制方面，司机从上游隧道出来，应能看到下游隧道进口的标志和静态障碍物，并能及时采取措施。按此考虑，间距应大于车辆的制动距离。表 4.7 给出不同计算速度考虑连续或毗邻隧道间距

的最大值。

表 4.7 连续或毗邻隧道间距的最大值

Table 4.7 The maximum distance between continuous or adjacent tunnels

计算速度 / (km · h ⁻¹)	40	60	80	100
交通控制 (m)	32.23	62.52	102.26	151.44
通风设计 (m)	150			
照明设计 (m)	333.33	500	666.67	833.33

综上所述，当隧道间距小于通风或交通控制设计所需的最大值，可定义为毗邻隧道，当隧道间距大于通风与交通控制设计所需的最大值且小于照明设计所需的最大值时，可定义为连续隧道。连续隧道仅考虑后续隧道入口段亮度折减率，毗邻隧道除考虑后续隧道入口段亮度折减率外，在通风设计中应考虑传流问题。对于交通监控和火灾报警，都可按一个隧道进行设计。

考虑到最小限速区间和运行速度的连续性，对于隧道群，可按照一个隧道来控制限速。

4.4.3 桥隧结合

处于营运中的桥梁普遍存在着搭板断裂及不均匀沉降，最终导致桥头跳车现象的产生。桥头跳车严重影响着行车的安全、速度、舒适和人们对高等级公路的总体评价，同时也影响了行车的使用寿命。

由于驾驶员驶出隧道的逃逸心理，车辆在驶出隧道时一般都是加速行驶，车速比较高。当隧道与桥梁相结合时，可能会出现以下危害：

- 当车辆高速行至桥头陡坎时，为防止车辆的猛烈跳动，驾驶员被迫刹车减速，降低了道路的使用功能。同时由于隧道内外路面附着系数的不一致，造成车辆跑偏，撞击桥梁护栏甚至坠入桥下等恶性事件发生。
- 由于车辆通过桥头陡坎引起跳车，使车辆颠簸，引起乘客及驾驶员的不适。同时隧道内压抑的行车环境与桥梁开阔的行车环境的强烈反差，驾驶员一时难以适应，这将对其产生相当不利的心理影响，严重时则会影响对车辆的正常操作，造成行车事故。
- 车辆快速驶出隧道通过桥头时产生的跳动和冲击，将会对桥梁和道路造成附加的冲击荷载，加速了桥台、桥头搭板、支座及伸缩缝的损坏，特别是支座和伸缩缝的破坏，同时也加剧了车辆的机件、轮胎等磨损，降低了车辆的使用寿命。

道路上的桥梁宽度与隧道宽度的相一致。有资料表明，当桥梁宽度小于道路宽度时，相对交通事故率急剧增加，如表所示桥梁宽度与相对事故率的关系表 4.8：

表 4.8 桥梁宽度与相对事故率关系

Table 4.8 The relative relationship between bridge width and the accident rate

桥梁宽度与桥梁入口处 道路宽度之差 (m)	相对事故率	桥梁宽度与桥梁入口处 道路宽度之差 (m)	相对事故率
-1.0	6	+1.0	1.5
0	3	+2.0	1

如果桥梁宽度比桥梁入口处道路宽度多 2m，相对事故率为 1，则桥梁宽度比道路宽度窄 1m 时，相对交通事故率为 6。减少事故率的有效方法就是控制车速。

因此，对于桥隧结合的合理限速，有助于增加行驶的安全性、延长桥梁和车辆的使用寿命。

4.4.4 隧道与长下坡结合

根据上文分析的交通事故率 AR 与纵坡的关系曲线（图 3.8）：

当纵坡在 0~2% 之间时，上下坡事故率基本相同，且数值较小；当纵坡大于 2% 时，下坡事故率开始大于上坡事故率，而且下坡事故率曲线迅速上升。由此可见，下坡路段比上坡路段更危险。

由于隧道与上坡组合的形式事故率较低，这里我们重点分析隧道与长下坡结合的形式。

长大下坡的判别条件为：连续下坡平均纵坡度大于 3%，总长度大于 5km，且纵坡度小于 3% 的路段长度总和小于 1000m。从目前所发生的交通事故看，长大下坡路段对货车的影响较严重，对小客车影响较小。

隧道与长下坡结合分为三种形式：隧道出口与长下坡组合，长下坡与隧道入口组合，长下坡、隧道、长下坡组合。

对于长下坡与隧道组合，车辆尤其是载重大型货车在长下坡行驶时速度难以控制，以高速驶入隧道，由于道路摩擦系数的变化、驾驶员暗适应过程的减短等，极易发生交通事故。

对于隧道与长下坡组合，隧道内压抑的行车环境使驾驶员高速驶离隧道，驶入长大下坡路段，如果此时路面湿度较大，路面附着系数较小，则刹车距离增大，而路段平曲线半径较小，就会存在重大安全隐患。

对于长下坡、隧道、长下坡组合，属于上述两种情况的累加，此时更为复杂，

危险性也更大。

4.4.5 隧道组合形式对限速值的修正

隧道组合形式主要有以下几种，根据大量调查数据分析、研究表明，其对隧道限速的影响程度如下表 4.9 所示：

表 4.9 隧道组合形式对限速的影响程度

Table 4.9 Tunnel combination form to regulating influence of speed

隧道组合	平直路段与隧道	长大下坡与隧道	弯道与隧道	桥遂组合	隧道群
影响程度	1	1.0-1.5	1.0-1.5	1.2-1.8	1.5-2.0

在分析平直路段与隧道限速值的基础上，根据隧道组合的形式对其进行限速修正。可依据影响程度不同比独立隧道降低车速限制值： ΔV 为 5 km/h——15 km/h。

第五章 合理限速方案的确定

5.1 限速方法

目前，国内外常用的限速方法有以下几种^[1, 24, 25, 26]：

5.1.1 限速标志

限速标志或可变限速标志是最基本的限速手段。关于限速标志的设置，美国的 MUTCD（交通控制设施手册）建议：同一块限速标志或标志组不允许出现多于 3 个的限速值；限速标志的限速值应该是自由流状态下 85% 车速±10km/h。实际设立限速标志时可能需要考虑以下的其它因素：

- 道路特征、路肩条件、等级、线形和视距等；
- 路侧土地使用和环境；
- 一个时间段的事故报告；
- 交通政策法规。

1) 限速方案

- 统一限速，不对车型、天气等加以区分，采用统一的限速值，如下图；



图 5.1 单一限速

Fig5.1 Single speed limit sign

- 分车型限速，对小客车、大客车、货车加以区别限速，如下图：



图 5.2 分车型限速标志

Fig5.2 Discrimination vehicles speed limit sign

- 分时间或天气限速，如专门的夜间限速标志等。可变限速标志或情报板更适合该种情况，对于不同的天气和时间段调整限速值，如下图：



图 5.3 分天气限速标志

Fig5.3 Discrimination Weather speed limit sign



图 5.4 可变限速标志

Fig5.4 Variable speed limit sign

- 分车道限速，划分快慢车道，把每车道的速度分布控制在较小的范围。



图 5.5 分车道限速标志
Fig 5.5 Dividing lane speed limit signs

➤ 分路段限速

对于里程较长的高速公路，尤其是山区高速公路，因其存在平纵线形较差、长下坡、隧道等特殊路段，应对该种情况分段限速，以保证行驶的安全性。

限速标志限速是对应一个区段的，这个区段应该有多长，国内标准没有规定或说明。澳洲的 MUTCD 规定了限速标志的一个最小的设置区间。

表 5.1 澳洲的 MUTCD 规定的最小限速区间

Table 5.1 Australia's MUTCD specified minimum speed limit interval

限速值/ km · h ⁻¹	40	50	60	70	80	90	100	110
最小长度/ km	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	2.0	10

➤ 建议性限速和强制性

对于一些高速公路，又分为建议性限速和强制性限速。

2) 限速方案的选择

在选择高速公路限速方案时，首先考虑的因素是“道路交通安全法”对高速公路限速的规定；其次是空间因素，空间上是否可以对高速公路进行分段或分车道限速；再次是时间因素，时间上是否可以分时段限速，能更好的反应交通变化；最后考虑的因素是否适合分车型限速。以上几种因素重要性依次是法律因素>空间因素>时间因素>车型因素。在确定最终限速方案时，应按照因素重轻次序，依次考虑每个因素，最终可判别选出限速方案。

➤ 依据“道路交通安全法”

在确定最终限速方案时，应考虑我国《道路交通安全法》及实施条例关于高速公路限速的规定。我国法规规定，高速公路最高限速值不能超过 120km/h，最

低限速不能低于 60km/h。在高速公路上行驶的小型载客汽车最高车速不得超过 120km/h，其他机动车不得超过 100km/h，摩托车不得超过 80km/h。此外确定限速方案时，还需考虑平衡运输安全与运输效率之间的关系，满足驾驶员行车需求。

➤ 空间因素

影响限速方案选择的空间因素包括高速公路长度及高速公路行车道数量。高速公路长度大于等于100km，可根据全线限速方法判断是否实行分段限速。一般单向两个行车道不宜设置分车道限速，而当单向行车道数量大于等于3个时，宜选用分车道限速。行车方向内侧车道为高限速值车道，外车道为低限速值。相邻两个车道限速值相差20km/h或为零。同时，分车道限速，每个车道要有最低限速要求，最低限速值比车道最高限速值低20km/h。

➤ 时间因素

在时间上进行限速考虑，主要是基于以下三种情况：道路交通事故中，夜间发生的事故占据总事故的60%以上，可采用分黑夜、白天限速方式；恶劣天气条件，如果全年中气候影响车辆行驶比较严重，比如雨、雪、雾的影响行车时间超过40%以上，考虑分天气条件限速；交通流量变化，交通流量随时间变化较大，亦考虑分时段限速。

➤ 车型因素

当大型货车所占的比例大于40%时，考虑采用分车型限速，一般要把大型货车的限速值与小客车限速值相差20km/h。针对单向三个及三个行车道以上的高速公路，宜采用分车型、分车道结合使用的限速方案。行车方向，内侧车道为限速的最高值，并且只能小客车使用，外侧车道为混行车道。

设置的限速标志不是一劳永逸的，发生较大变化的路段的限速标志应进行再评估，以适应经济的发展、道路条件的改善和驾驶员的行车期望。

5.1.2 减速丘

有许多研究证明了减速丘是一种比较有效的限速手段，甚至有研究表明事故数和严重度的降低达到 50%以上。英国的 Webster 分析在设了减速丘后，85 %车速降低了 16km/h，所设道路上事故数减少了 71%，周围道路事故数减少了 8 %。减速丘在我国应用的较多，还没有相应研究说明减速丘在我国应用的效果。但无论效果怎样，基于我国的应用经验，应该注意两点：

1) 减速丘应全断面布置，如果只是下坡方向布置(半幅路)，车辆为了避免行驶其上的不舒适感，会绕行而占用对向车道，更容易造成车辆对撞。

2) 布置减速丘的路段，应提前告知驾驶员，否则，驾驶员如果没有看见减速丘（尤其是夜晚）车速较高也容易发生事故。可以用标志或标线表示。

5.1.3 减速标线

我国在相关规范中只规定了收费广场前减速标线的画法，至于路段上减速标线，国内外应用的种类形式多种多样，其中应用较多的是在车道上施划的成组的横向标线，无论线条的宽度、间距、一组的个数等如何变化，基本上可以归结为两类。

1) 标线宽度、间距、个数不变。仅起提示作用，告知驾驶员这是减速标线，应该减速。台湾的交通工程手册里描述：标线宽 10cm、间隔 20cm、6 条一组，每隔 30~50m 设置一组。

2) 标线宽度、间距逐渐变小。当驾驶员恒速行驶时，宽度和间距渐变的横向标线给驾驶员的感觉是他的车速越来越快，这样他会逐渐减速以减缓这种视觉和心理感受。

5.1.4 采用驾驶限速辅助设备

这是在汽车中安装的辅助驾驶设备，使驾驶员在十分舒适的环境中更好地遵守道路安全车速。它使得驾驶员能够严格的按照安全车速驾驶，显著降低交通事故发生量及危害性。一般由研究人员和汽车制造商共同开发，目前可见的有：

- 信息型和被动型车速限制器；
- 普通车载限速装置，一般有最高车速限制装置或可调整型车速限制器。
- 智能型车速限制器。如法国的 LAVIA 系统。

5.1.5 隧道限速方法建议

1) 分车道限速

根据上章 4.2.1、4.2.4 和本章 5.1.1 小节的分析，对于单洞大于两车道的长大隧道，可尝试采用分车道限速，可以有效减少行车延误和换车道概率，从而到达安全高效的目的。对于两车道隧道，其适用性还有待于探讨。

目前国内公路隧道还没采用此种限速方法。

2) 可变限速

根据第三章 3.1、3.2 和第四章 4.1 小节的分析，隧道洞口处易采用可变限速标志或可变情报板来限速，根据不同的天气、交通等情况，通过改变限速值来控制车速，调节车辆运行状态，达到安全的目的。

目前这种限速方法在新建隧道或在建隧道的监控设计中被广泛采用。

3) 辅助限速

设置限速标志后，驾驶员的遵守与否将影响限速的效果，在限速的同时可考虑设置减速带等辅助限速。

5.2 标志设置位置分析

5.2.1 限速标志视认性的影响因素分析

影响驾驶员对限速标志视认的因素主要有分为驾驶员自身特性，标志的设计情况以及交通和天气情况等。

表 5.2 影响标志视认因素

Table 5.2 Affected ingredient for identifying traffic signs

驾驶员	性别、年龄、驾驶经验、视觉特征、重视度、情绪等
设计	标志的形状、颜色；标志的符号、文字、尺寸；标志中文字的字体、尺寸；材料反光度等
设置	距离车道中心距离、高度、顺序、倾斜角度
道路	道路宽度、线形、坡度等
天气	阴、晴、雾、雨、雪等
交通状态	交通流量、密度、是否跟驰等
车辆状态	车辆速度、类型

对于可变限速标志，作为智能交通系统(ITS)中的重要信息发布设备，广泛应用于高速公路或城市交通监控系统，由监控中心计算机通过综合通信网实现远程控制，高速路限制行驶速度警示，促进行车安全。LED 可变限速标志是综合应用光电技术、计算机技术和自动控制技术研制而成的高科技产品，一体化显示模块设计，结构灵活可根据不同的客户需要量身订做。技术及安装的实现依据《中华人民共和国交通行业标准》/JT4322000 中的《高速公路 LED 可变信息标志技术条件》/JT/T4312000，以及国家相关标准。影响其视认性的主要技术指标为：

LED 波长（单只像素管）；显示图形及数字；动态视认距离；灯箱尺寸；显示图案直径；额定功率等。

依据认知心理学理论以及问询驾驶员可知，行车过程中驾驶员对交通标志的认知过程大体是：觉察—识别—认读理解—决策—动作反应五个阶段，对交通标志完整的认读过程主要是依靠驾驶员视知觉和运动输出来完成的。

5.2.2 标志设置位置分析

为了满足驾驶员在认读完标志后有足够的反应时间和决策时间，需要把标志前置一定距离设置。该距离与驾驶员的行驶速度、减速度以及驾驶员的反应时间

有关。目前较为常用的计算交通标志的设置位置的模型如图 5.6 所示，通过计算标志的前置距离 D 来确定交通标志的设置位置^[4, 5, 6]。

该模型注重驾驶员在读完交通标志后的行为过程计算，很少体现驾驶员决策之前的行为分析。交通标志的感知距离和驾驶员的反应时间影响着驾驶员能否在限定的距离内完成对交通标志的决策以及操作动作的完成，因此对影响交通标志感知距离和驾驶员反应时间的因素分析尤为重要。通过这些因素的分析有助于交通设施管理人员对交通标志设置位置的选择，使交通标志的设置更符合驾驶员生理、心理需求，提高道路交通安全。

图 5.6 是驾驶员的认知、对车辆进行操作过程及标志的设置示意图，各点的含义如图所示，其中驾驶员在 A 点发现标志，在 B 点识别完并开始认读，BC 是标志认读距离；CD 段是驾驶员的判断决策距离；E 点开始执行操作的点，DE 段是驾驶员的反应距离；F 点是标志消失点，标志的设置必须保证驾驶员在 F 点之前读完标志；G 点为标志设置点；H 点是行动完成点。其中，BC 是标志的视认距离 x；GI 是标志设置的前置距离 D；CG 是认读完标志后的距离 s；DH 是驾驶可操作距离 z。

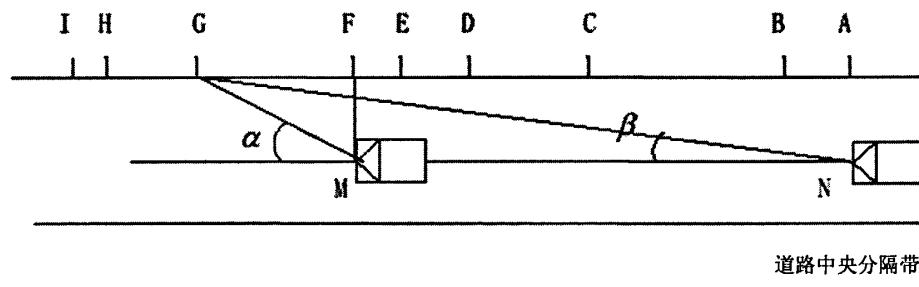


图 5.6 驾驶员视认标志过程

Fig5.6 Process for the driver Identify signs

依据上述定义，下面对驾驶员有效完成标志视认的条件及原理进行分析。

首先考虑交通标志设置的一个基本依据：认读、决策结束后的距离 CG 必须大于可操作距离 DH 即 $s > z$ 。若 $s \leq z$ ，则驾驶员在读完标志后就没有足够的时间对信息进行分析判断，或者操作不完全而引发交通事故。由于距离 s 可以根据实验得到，因而根据上述关系，这一条件可以用下式表示：

$$s = l + D - j \geq (n-1)s^* + \frac{l}{2a(v_1^2 - v_2^2)} \quad (5.1)$$

$$l \geq m = \frac{d}{\tan \alpha}$$

式中： l ——读完点 C 到标志 G 的距离；
 D ——标志设置的前置距离；
 J ——驾驶员的判断距离；
 n ——车道数；
 S^* ——一次变换车道所需要的距离；
 a ——减速度；
 v_1, v_2 ——分别是经过变换之前/之后的车速；
 m ——消失距离(可用判断时间 t 和行驶速度 v_1 计算)；
 d ——驾驶员眼睛的高度到标志的侧距(标志为侧安装)或到标志上方的高(标志为顶部安装)；
 α ——标志消失点临界视角(标志侧安装时, 为 15° ; 顶部安装时为 $7 \sim 8^\circ$)。

这样就可以确定出标志的前置距离 D 以及标志设计的高度。值得注意的是, 在计算标志前置距离时, 应考虑标志周围实际状况, 避免绿化树木或其它交通设施的遮挡, 适当调整标志位置便于驾驶员的视认。

5.2.3 车速对交通标志识认的影响

我国科学院心理学研究所对驾驶员确认交通标志的距离与车速的关系进行了现场实验, 结果如下表^[4]:

表 5.3 车速对交通标志识认的影响

Table 5.3 Vehicle speed influence which recognizes to the traffic signs

标 志 类 别	警 告					禁 令					指 示				
	速 度 (Km/h)	步 行	40	60	80	100	步 行	40	60	80	100	步 行	40	60	80
平均识认距离(米)	316	272	239	212	179	390	336	307	276	239	493	435	411	374	326
识认距离递减率(%)	0	14	24	33	43	0	14	21	29	39	0	12	17	24	34
视 角 (分)	4.35	5.05	5.75	6.49	7.68	3.53	4.09	4.48	4.98	5.75	2.79	3.15	3.35	3.68	4.22

实验结果表明, 车速越高, 识认标志的距离减小。他们认为, 高速驾驶条件下, 人的生理和心理上负荷加重可能是识认标志距离缩短的主要原因。

5.3 常用的限速模型

5.3.1 通常的限速值确定方法

合理地限制车速是确保公路安全、高效运营必不可少的措施，确定车速限制值的方法有很多，各国的确定方法通常考虑下列因素：85%位车速、交通法规、交通量和车辆组成、设计车速、公众意见、路面特性和道路宽度、现有的交通控制设施以及平均车速等。

通常的限速值是由V85%位车速来确定车速限制值。研究表明，85%位车速处于事故率最低的车速范围，平均车速加上一倍的车速标准差大约等于85%位车速，若车辆以高于平均车速二倍标准差的速度行驶，则事故率将明显提高。

85%位车速是道路特性参数的函数，它起初是基于具有相似特性的长路段来确定的。而新的研究表明，对单个设计单元的研究才更具有实际意义，用于描述这种函数关系的最成功的道路特性参数是带有缓和曲线的单圆曲线曲率变化率（在下文中，该参数统一称为CCRs），其定义为带有缓和曲线的单圆曲线单位长度的转角。该参数描述了曲线长度与曲率的关系，使道路设计者可以对道路线形的连续性进行宏观分析，从而设计出更为安全的道路线形，是说明85%位车速与事故率之间关系的一个重要变量。研究表明，随着CCRs的增加，事故率将会升高，故根据CCRs与85%位车速的关系确定车速限制值是一种降低事故率的行之有效的方法（如第一章1.3所述）。

裴玉龙等通过建立85%位车速与CCRs回归模型来研究限速值，得到如下关系：

① 85%位车速与CCRs回归模型

小型车85%位车速与CCRs的回归模型为线性模型，与美国、澳大利亚等国的研究结果一致。关系模型为：

$$V_{85\%} = 103.18 - 0.8469CCRs \quad (5.2)$$

式中： $V_{85\%}$ ——85%位车速(km/h)。

大型车85%位车速与CCRs的回归模型为指数模型，与加拿大的研究结果一致。关系模型为：

$$V_{85\%} = 81.531e^{-0.0066CCRs} \quad (5.3)$$

② 15%位车速与CCRs回归模型

小型车15%位车速与CCRs的回归模型为指数模型：

$$V_{15\%} = 68.051e^{-0.0141CCRs} \quad (5.4)$$

式中： $V_{15\%}$ ——15%位车速(km/h)。

此种方法没考虑不同行车环境下对限速值选取的影响。基于限速要素变化的

可变限速模型，可解决此问题。

5.3.2 限速要素分析

依据道路、交通、气候等条件，采用控制车速的手段，对高速公路交通流进行调节，确定能够允许的最大运输效益下的最佳速度和最佳密度，使交通流车速分布方差最小，事故率最低，以期达到最大的运输效率。道路、交通、气候等每一个条件影响驾驶员对车速的选择，它们还包含着诸多具体因素，这些因素称之为限速要素。

公路隧道限速段包括隧道前后 200m 范围段，影响车辆行驶的主要因素有：亮度、能见度、隧道特征（断面形式、洞口布置、长度、平曲线、坡度等）、路面附着系数、洞外天气、交通特征（流量、车型组合、V/C 比等）、隧道衔接组合形式等。

1) 亮度

隧道的“黑洞”和“明洞”效应以及驾驶员的暗适应与明适应过程，要求隧道的出入口必须满足一定的亮度。车速不同，对亮度的要求不同。因此，亮度的大小制约着车速的高低。

2) 能见度

安全行车，要求一定的安全视距，车速不同，安全停车视距亦不同。能见度影响驾驶员对安全车速的选择。

3) 隧道特征（断面形式、洞口布置、长度、平曲线、坡度等）

隧道的断面形式（车道数、车道宽度）、洞口布置（有无减光棚、洞口形式）、隧道长度、平曲线最小半径、最大纵坡等对车辆的高速行驶都具有一定影响。

4) 路面附着系数

隧道路面因素的影响主要是路面附着系数的改变。由于隧道是相对封闭环境，尘埃和车辆排出的废气沉积在路面上，长期得不到雨水冲洗、阳光暴晒，降低了路面的附着系数。当车辆高速驶入或驶出隧道时，若路面附着系数发生急剧变化（尤其是雨雪天），车辆的行驶速度稍有变化（加速或减速），车辆就容易打滑失去控制，从而酿成车祸。

5) 洞外天气

阴、晴、雨、雪、雾等洞外天气也会对隧道车速产生影响。天气状况对隧道交通安全影响和一般道路有明显的区别，后者由于天气原因所引发的交通事故发生在全路段或者路况较差的地方。隧道由于天气原因所引发的交通事故多发生在隧道出入口路段 50 至 200 米的地方。

6) 交通特征（流量、车型组合、V/C 比等）

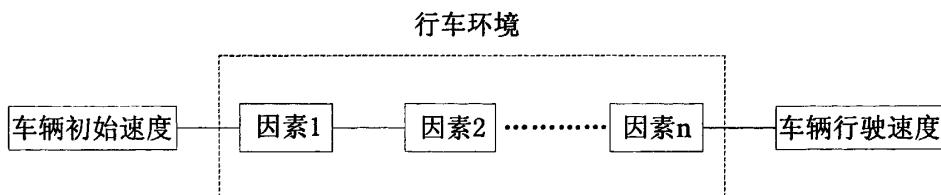
由于大小车型的车辆性能存在很大差异，车型组合比例的不同将直接影响个体车辆速度的选择，进而影响交通流的稳定性与波动性。交通量与交通流饱和度直接相关，而交通流饱和影响交通事故的频率和严重程度。

7) 衔接形式

与隧道衔接的形式有多种，主要有：独立隧道、隧道群、桥隧结合、隧道与长下坡结合等，每种衔接形式对车辆行驶的影响都不同。

5.3.3 基于限速要素的可变限速模型

限速因素属于串型影响行驶车速，即：



按照上述分析建立可变限速模型：

$$V = \prod_{n=1}^n f_n \times V_0 \quad (5.5)$$

其中： V_0 为良好条件下路段限速值， f_n 为各限速要素权值。

各因素权值的确定：各限速要素按照层次分析法和单因素法确定其对车速影响的权值，各隧道情况不同其权值不同。该模型缺点是各因素之间相互影响，各因素权值不好确定。

5.4 基于驾驶行为的限速模型

5.4.1 限速思想

前一节分析的限速要素影响驾驶员对行驶车速的选择。但行车条件相同时，不同的区域经济发展水平，驾驶员的期望行驶车速会有较大差异。主要为经济水平不同影响驾驶者的车辆性能、对行程时间（运输效率）的要求。驾驶员的车辆性能、驾驶技术、生理心理因素、生活环境等，决定了其在不同路况下对自由车速的选择、对限速条件的执行，个体之间存在很大差异。

不同的限速值对驾驶员车速的选择会造成不同的影响，驾驶员接受到限速信息后会做出车速调整以适应限速值。当车流经过限速区间后，整个车流的速度分布将发生变化。不同的限速值对车流的速度分布影响不同。使车速均值趋于最大和车速方差（或标准差）趋于最小的限速控制即为最佳的目标限制速度。

限速对驾驶行为的影响分析是模型的关键。

5.4.2 限速模型的建立

当驾驶员接受到限速信息后会对已有速度做一判断，而后做出速度选择，对初始速度做出调整来符合限速值，即限速控制影响车速的选择。

设初始速度为 V_0 ，驾驶员接受限速信息后的调整车速为 V_T ，那么在一定的限速值 V_g 下，有：

$$V_T = f(V_g, V_0) \quad (5.6)$$

其中： f 为 $V_0 \rightarrow V_T$ 的基于驾驶行为的车速选择函数，通过驾驶员心理实验得出。

在无限速条件下，交通流的初始车速的分布方差为 $\sigma_0^2 = (E - V_{0_i})^2$ ，车流经过限速区间，交通流的调整车速的分布方差为 $\sigma_T^2 = (E - V_{T_i})^2$ 。

根据前面分析，当 $\sigma_T^2 = (E - V_{T_i})^2 \rightarrow \min$ ， $E \rightarrow \max$ 时，交通事故率最小，运输效率最高。因此， $(\sigma_T^2 \rightarrow \min) \cap (E \rightarrow \max)$ 时的 V_g 即为最佳限速值。

5.4.3 车速选择函数的确定

对于车速选择函数，本文由以下三种途径给出：

1) 第二章 2.3 节分析的车速选择模型：

$$V_T = \frac{V_0}{1 + c \cdot d^{z^2}} \quad (5.7)$$

式中， V_T ——限速标志区间内，自由流车辆的中位车速；

V_0 ——进入限速标志区间前，自由流车辆的中位车速；

$z = \frac{V_g}{V_0}$ ，即限速标志的限速值 V_g 与 V_0 的比值；

c, d ——影响模型的标定常数。

对于该模型，前文已经给出，这里不在重复叙述。

这种方法需要大量的问卷调查和实验作为足够的样本量来标定常数，受实验条件限制，本文采用仿真的方法。

3) 仿真

采用仿真手段，通过设置仿真软件自定义参数，来模拟驾驶行为，既能满足

模型要求也便于实现，本文以仿真为手段加以应用。

5.5 仿真评价

限速值的合理与否对驾驶员和交通流都有一定的影响，主要体现在：对群体驾驶员的行程时间、延误、速度等的影响；驾驶员群体服从性；紧密跟驰行为的影响；交通流密度、道路占有率和平均延误等。

由于隧道实际状况复杂，对驾驶员的影响和干扰因素较多，因此本文采用仿真模拟的手段来研究限速标志对群体驾驶员和交通流的影响。本文采用微观仿真软件 PTV/VISSIM4.0 版本进行仿真。

5.5.1 VISSIM 简介

VISSIM 是一种以 1/10s 为时间步长、基于行为的微观交通仿真软件，用于城市交通、高速公路的仿真建模。软件可以对道路条件，交通组成，限速值、速度分布等参数进行设置。能够生成行程时间、延误、速度等仿真数据和评价指标。

5.5.2 交通属性定义

1) 建立仿真道路模型

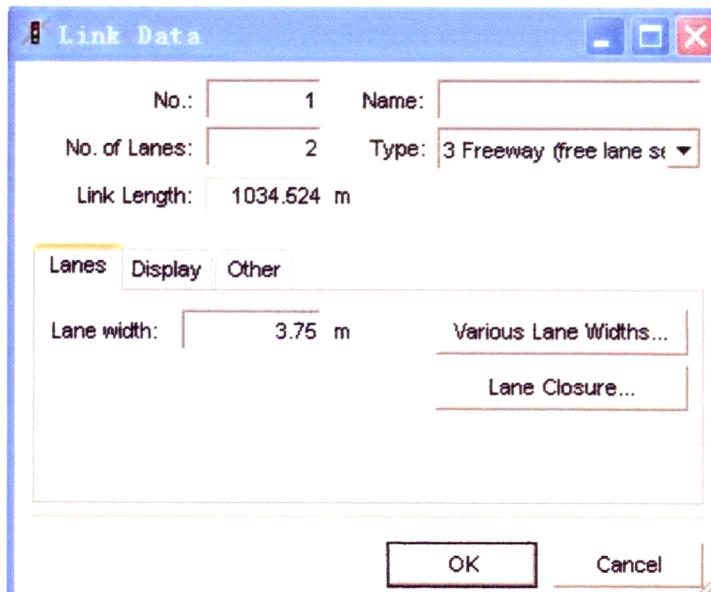


图 5.7 道路定义

Fig5.7 Definition of road

主要定义路段长度、车道数、车道宽度、纵坡、平曲线等。

2) 期望车速（初始车速定义）

期望车速是车辆进入系统后如果没有其他车辆或交通规则的干扰时车辆可长时间维持的车速。定义时依据依托工程的实际数据。

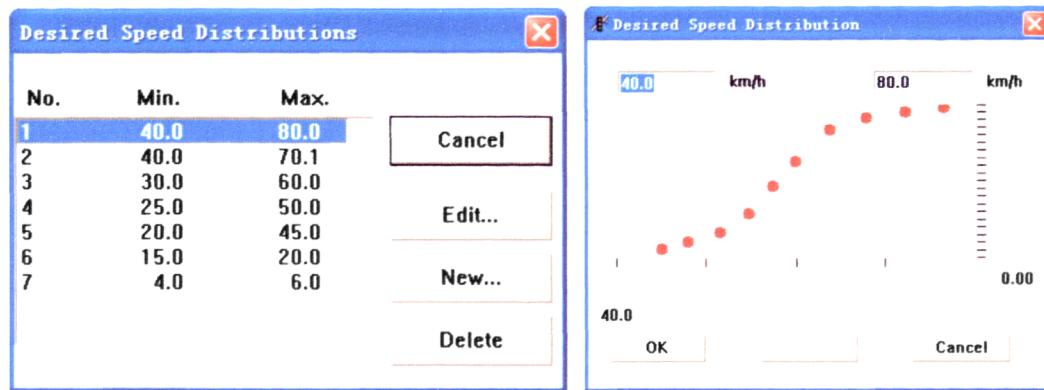


图 5.8 期望车速和分布曲线

Fig5.8 Expectations of the vehicle speed and the distribution curve

3) 交通构成

交通构成包括多种车辆类型及在输入交通流量中所占的比例，各种车的组成比例和车速分布如图 6-3 所示。

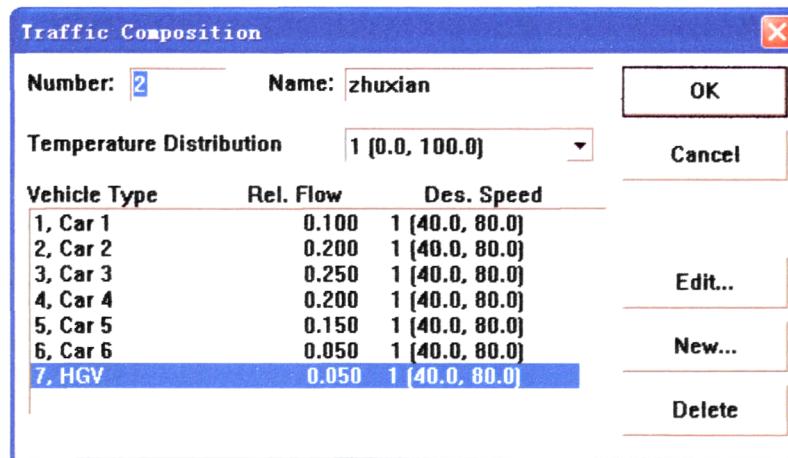


图 5.9 交通构成和车速分布

Fig5.9 Traffic constitution and the speed distribution

4) 驾驶行为的定义

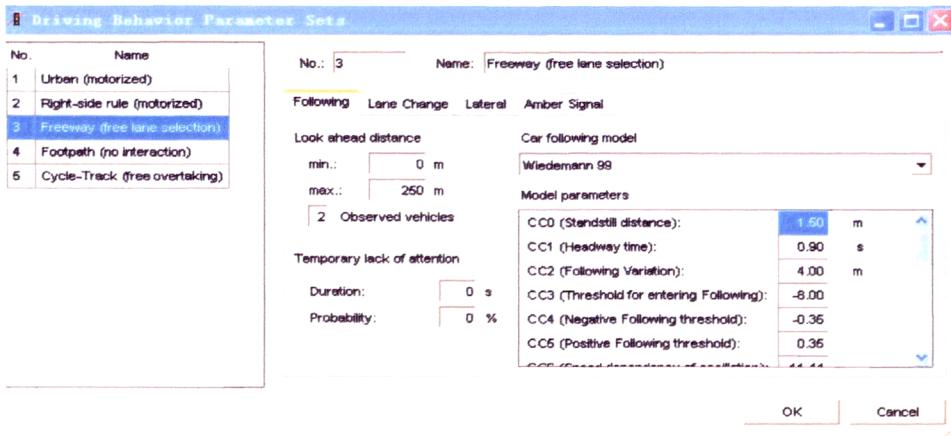


图 5.10 驾驶行为定义

Fig 5.10 Definition for driving behaviour

驾驶行为的定义包括跟车行为、车道变换、横向行为、改变饱和流率等。

5) 其余的交通流量、加减速特性、车辆尺寸等交通特征参数可根据实际需要设置。

5.5.3 仿真内容

1) 仿真目的

- 以广东石门坳隧道实际调研数据为例，研究不同限速值对车速的影响，得出结论；
- 根据依托工程实际情况，得出合理限速值。

根据研究目的，限速值的设置分为 5 种：①未设置限速；②设置限速值 70；③设置限速值 80；④设置限速值为 90；⑤设置限速值为 100。为便于处理数据和保证数据的精确性，每个过程仿真时间设置为 1 小时，并对模拟数据汇总和分析。

2) 仿真参数设置

根据广东石门坳隧道实际调研数据，定义隧道长度为 2.25km、车道宽度为 3.75m，车道数为 2，交通量为 260 辆/h，车辆类型比例、车辆的期望速度见下表：

表 5.4 道路车辆状况构成表

Table 5.4 vehicles condition constitution

车辆类型	小客	中客	大客	小货	中货	大货
比例	41.13%	1.11%	1.05%	1.21%	6.1%	39.92%
自由流速度 (km/h)	70-110	65-100	65-95	60-90	55-75	55-70
平均车速 (km/h)				69.75		
车速标准差				11.53		

3) 关键参数设置

对于由 vissim 仿真高速公路隧道，驾驶行为的设置至关重要。驾驶行为的设置主要包括：

- 1) 跟车行为：包括前视距离、观察车辆数、暂时性的走神、跟车模型；
- 2) 车道变换：必要车道变换、自由车道变换、一般行为；
- 3) 横向行为：自由流中的期望位置、最小横向间距、同车道超车等。

根据前几章分析隧道与路段的差异，通过定义驾驶行为和道路条件来区分隧道与路段的差别，使仿真环境更适合隧道实际情况。

4) 仿真过程

每个仿真过程为 1 小时，输出结果定义为速度数据，如下图所示：

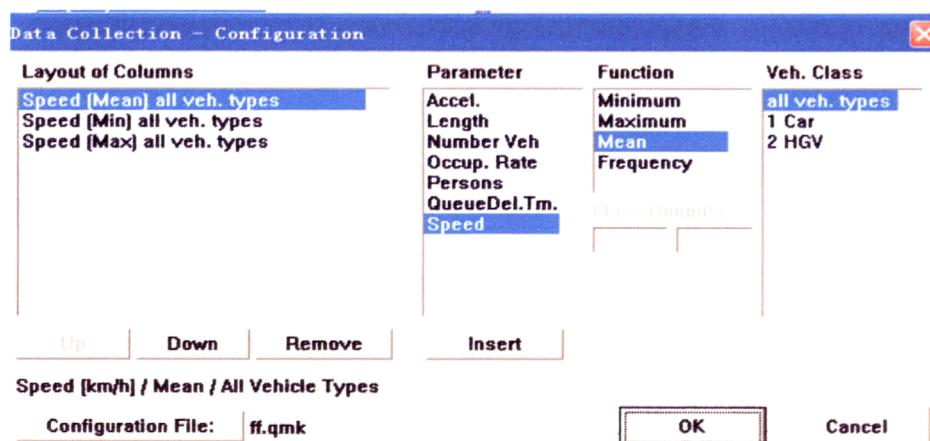


图 5.11 仿真输出数据定义

Fig5.11 Definition of simulation output data

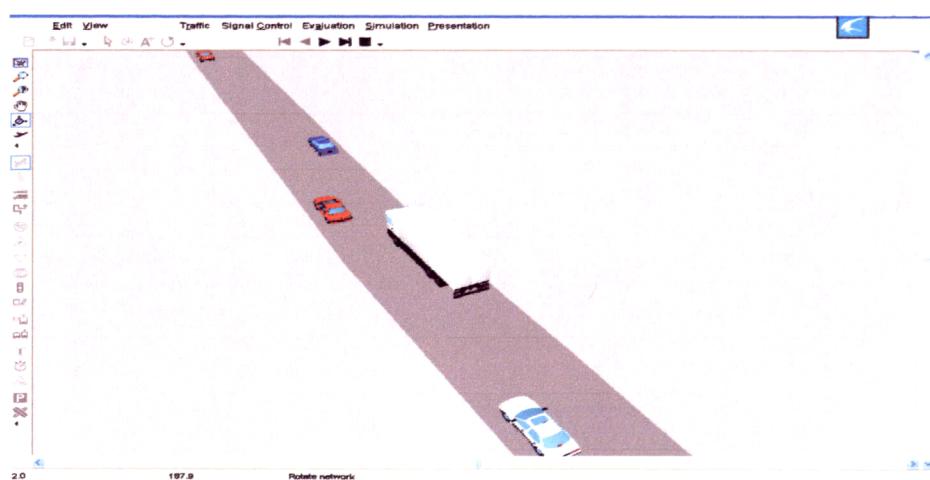


图 5.12 仿真过程截图

Fig5.12 Simulation process truncation chart

5.5.4 仿真数据整理分析

1) 数据整理

仿真过程限速值分别采用：①无限速；②低速 50，高速 70；③低速 50，高速 80；④低速 60，高速 90；⑤低速 60，高速 100；初始速度符合广东石门坳隧道调研数据。仿真数据见附录，数据整理为下表：

表 5.5 仿真整理数据

Table 5.5 Simulation data processing

限速值	50, 70		50, 80		60, 90		60, 100	
速度指标	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
初始速	69.96	11.34	69.96	11.34	69.96	11.34	69.96	11.34
限速后	60.70	6.68	66.25	9.41	69.74	7.28	71.87	9.52
相差值	9.26		3.71		0.24		-1.91	
超速率	14.7%		12.03%		2.94%		0.42%	

2) 数据分析

a) 限速对车速均值的影响

当限速为 (50, 70) 和 (50, 80)，限速后的车速均值减小较大，主要是车速较高的小车速度受到限制，致使车速均值减小；而当限速为 (60, 100) 时，低限值 60 起较大作用，主要影响大货车驾驶员对车速的选择，此时对性能较高的小车无明显影响，车速均值反而增大。

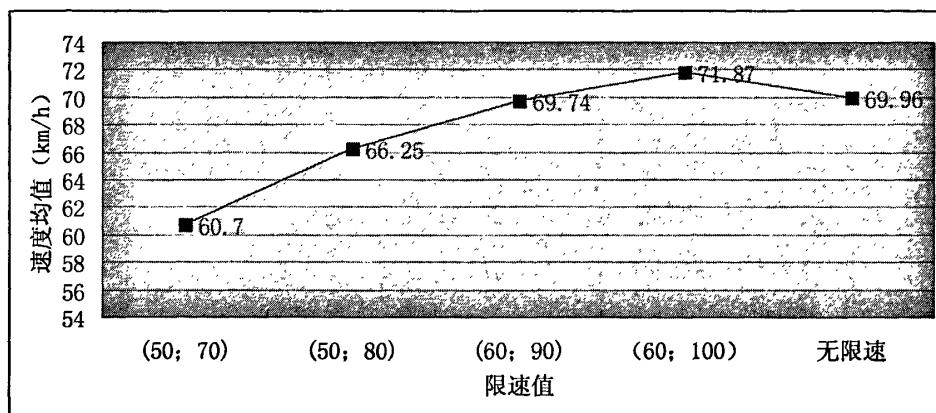


图 5.13 限速对车速均值的影响

Fig 5.13 The influence of vehicle speed average value for speed limit

b) 限速对车速标准差的影响

①限速 70 时

限速 70 对于车速均值的影响很大，减少了 9.26km/h，驾驶员超车率为 14.7%。由于高低限速值区间较小，故车速分布标准差最小，如图所示。从运输经济性和安全性考虑，此限速值不合理。即影响运输效率也不满足驾驶员的行车要求。

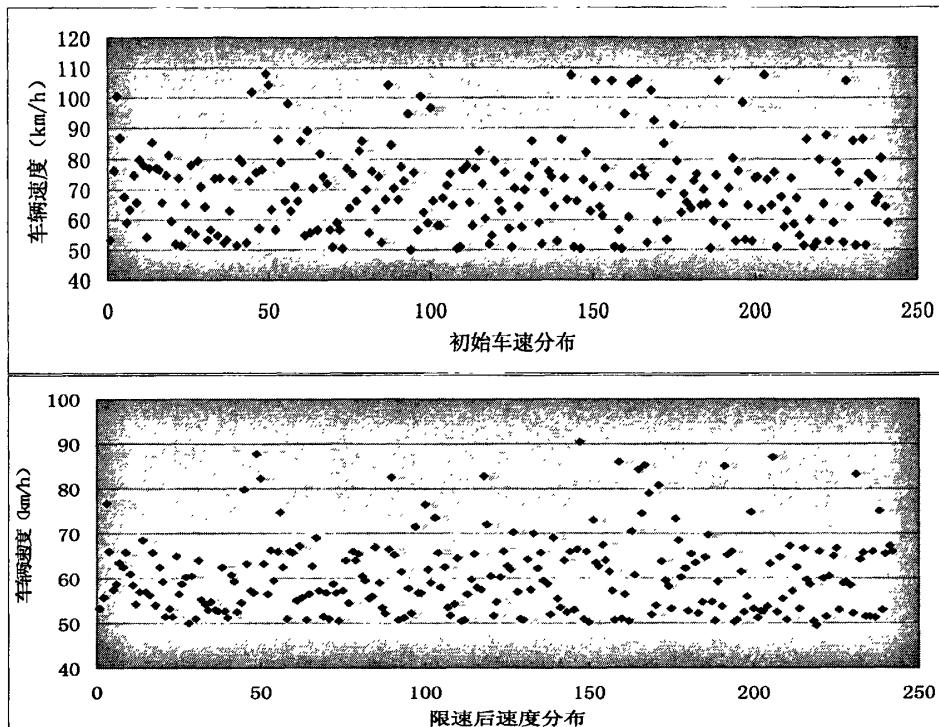


图 5.14 初始车速与限速 70 时的车速分布对比

Fig5.14 Vehicle speed distribution contrast

②限速 80 时

广东石门坳隧道目前限速值即为 80km/h。限速 80 致使车速均值减少 3.71km/h，驾驶员超车率为 12.03%，标准差也较高。根据实际驾驶员问卷调查表 2-10，有 37% 的驾驶员期望能提高限速值，而且京珠北高速是南北贯通较大的运输通道，限速过低影响运输效益，故限速 80km/h 也不建议。

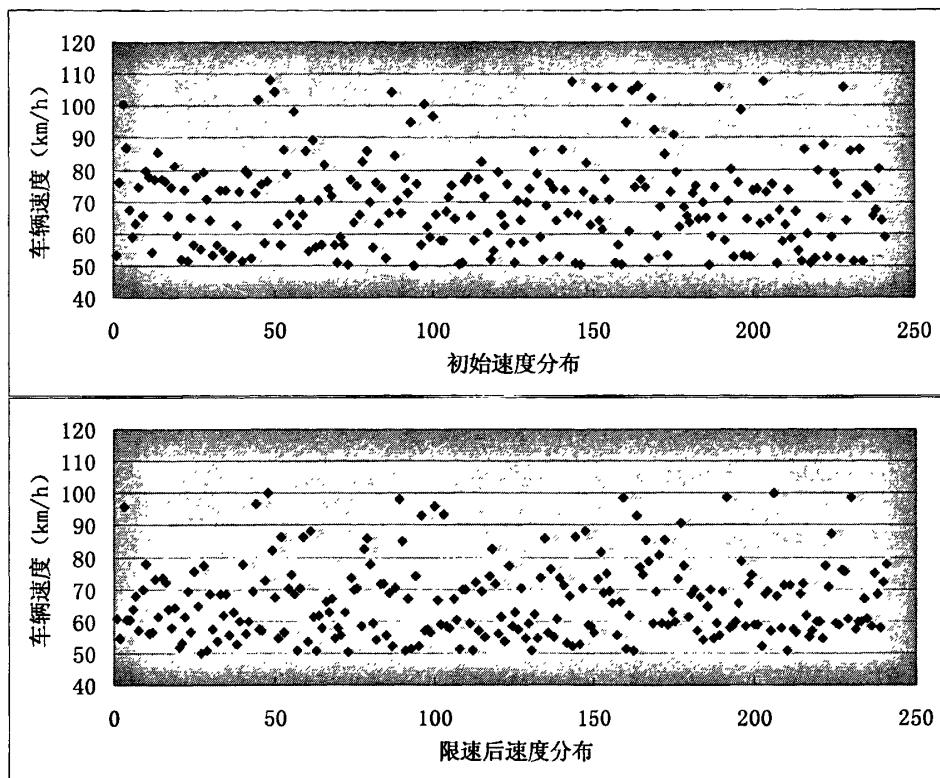


图 5.15 初始车速与限速 80 时的车速分布对比

Fig5.15 Vehicle speed distribution contrast

③限速 90 时

限速 90, 此时车速均值与初始车速基本相同, 不会对运输效率产生大的影响。车速标准差也较低, 交通稳定性较好。而 90km/h 为调研车速的 84.2% 车速, 85% 位车速为 91.2km/h。无论是驾驶员行车期望限速值, 运输效率还是交通稳定性都符合限速要求。建议广东石门坳隧道限速为 90km/h。

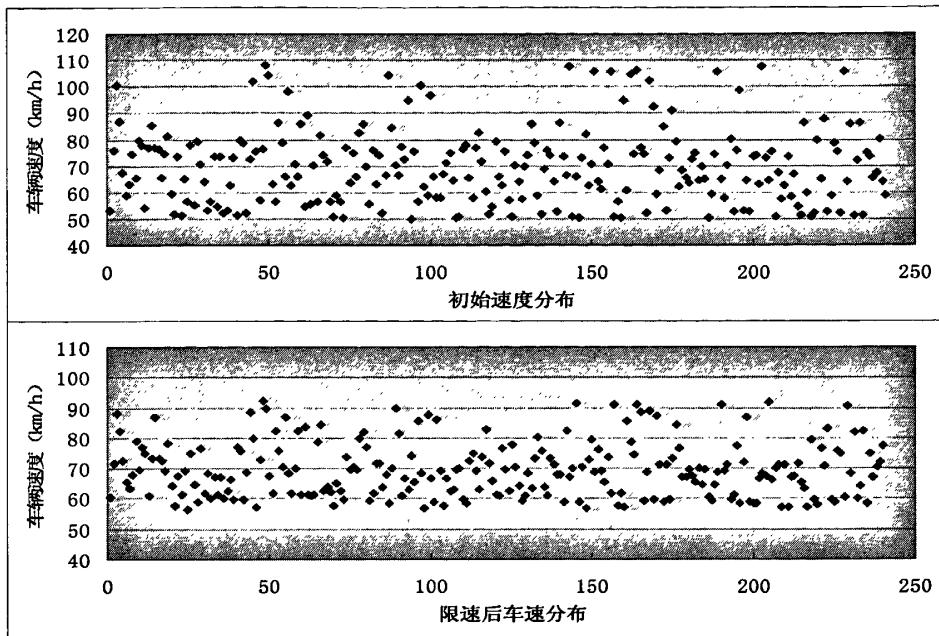


图 5.16 初始车速与限速 90 时的车速分布对比

Fig 5.16 Vehicle speed distribution contrast

④限速 100 时

此时车速离散性较大，车速较高，不利于行车安全，同时对运输效益也没明显提高，不建议采取。

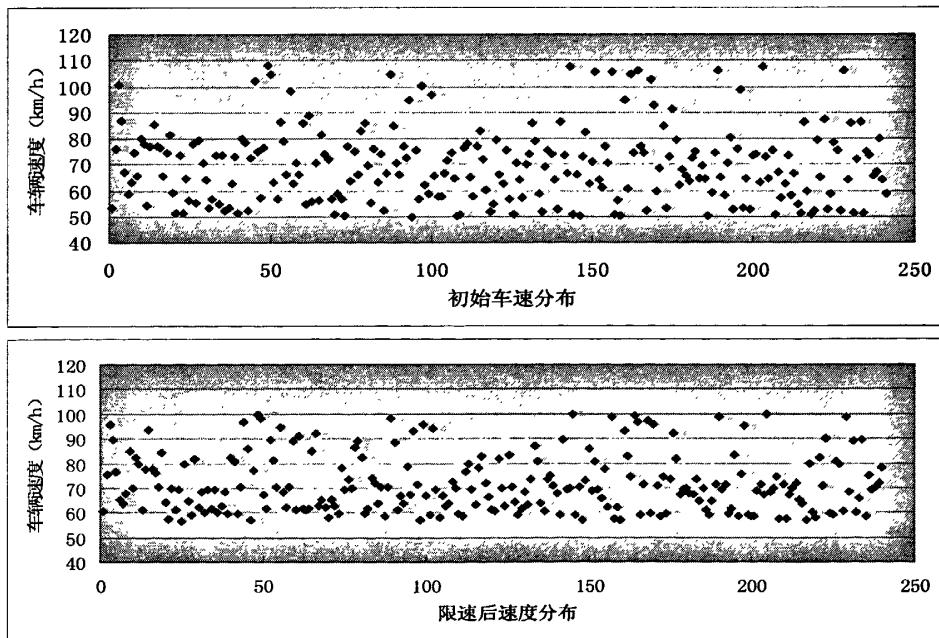


图 5.17 初始车速与限速 100 时的车速分布对比

Fig5.17 Vehicle speed distribution contrast

5.5.5 仿真结论

- 1) 从仿真的统计结果中发现，在设置限速标志后，能够遵守的车辆达到总数的 85%以上，尤其是当设置限速值为 70km/h 时，超速行驶的行为只占到 14.7%，而限速 100km/h 时，超速率只有 0.42%，这与实际测量道路上的速度值有一定的偏差：实际调查中驾驶员的超速行驶要比模拟过程中超速行驶的现象要严重。分析认为，这主要是由于仿真中的驾驶员影响因素只有 VISSIM 仿真模型中所考虑的行为因素，而实际道路中，路况要更复杂，驾驶员的生理和心理特征也更加复杂，因此二者存在较明显的差异。总的来说仿真结果基本符合实际；
- 2) 对于广东石门坳隧道，建议最佳限速值为 90km/h；
- 3) 根据仿真结果与实际调研数据对比分析，采用仿真手段选择合理限速值方法可取，可以应用于依托工程限速值的选取。

第六章 依托工程限速值建议

6.1 依托工程简介

沪蓉国道主干线是交通部规划的国家公路主骨架网——“五纵七横”国道主干线中的“一横”。它东起上海，途经南京、合肥、武汉、重庆至成都。该路的建设，对于我国经济建设实施由东向西，由南向北，由内陆向外向型经济发展战略，具有极其重要的作用。同时，对加强我国西南地区与中南、华东地区的政治、经济和文化交流，对改善提高国道主干线的运输能力，促进沿线各省、市的经济发展等具有重要意义。

沪蓉国道主干线支线重庆忠县至垫江段位于渝东地区，起点为重庆市与湖北利川市交界的分水岭，接沪蓉国道主干线湖北省恩施至利川段终点，在双笕附近穿方斗山脉，经磨子乡，在忠县县城附近的康家沱跨长江，在漕溪坝附近接沪蓉国道主干线支线重庆忠县至垫江公路的起点，路线总里程为 80.33km。该项目直接影响区为重庆市及其东部地区，路线沿线地区为重庆市垫江县、忠县、石柱县，直接影响区为湖北省恩施土家族苗族自治州、利川市、四川省邻水县等。本项目建成后，将形成重庆市通往渝东及中国东部各省份的快读通道，为渝东等经济落后地区的发展创造良好的基础设施条件，同时加大重庆市的经济辐射力度，对于促进渝东地区、湖北恩施地区乃至整个西部地区的经济发展具有重要的意义。

本项目主要技术参数如下：

表 6.1 道路设计参数

Table 6.1 Road design parameters

序号	指标名称		单位	数量
1	路线长度		Km	80.330654
2	平曲线个数		个	74
3	路线增长系数			1.383
4	平曲线占线路比例		%	58.55
5	竖曲线占线路比例		%	48.69
6	平曲线最小半径		m/个	411.56/1
7	最大纵坡		%/处	4.8/1
8	最短坡长		m/处	400/2
9	变坡点个数		个	87
10	竖曲线 最小半径	凸形	m/处	7500/2
		凹形	m/处	8000/1

1. 吕家梁隧道

石忠高速公路吕家梁隧道位于重庆市石柱县沙子镇境内，全长 6663 米，长度位居全线第二、西南第三，为全线重点控制性工程。

其主要设计技术标准为：

- (1) 公路等级：高速公路（双洞四车道）
- (2) 计算行车速度：80km/h
- (3) 设计交通量：35601 辆/日。
- (4) 隧道建筑限界：宽 10.5m（单洞）、高 5.0m。

隧道右洞起止桩号为 K23+779~K30+442，长 6663m，左洞起止桩号为 ZK23+792~ZK30+456，长 6664m。吕家梁隧道位于 B6、B7 两个标段，其中 B6 合同段右洞起止桩号 K23+779~K27+100，长 3321m，左洞起止桩号 ZK23+792~ZK27+100，长 3308m，左洞通风斜井设于 B6 合同段内；B7 合同段右洞起止桩号 K27+100~K30+442，长 3342m，左洞起止桩号 ZK27+100~ZK30+456，长 3356m。

隧址区位于四川盆地东缘与鄂西山地之过渡地带，属中山构造侵蚀地貌，具脊状、台状峡谷地貌特征，其地形受构造及岩性控制明显，地形切割强烈，山势陡峭，地形陡峻，多陡坎、悬崖分布。隧址区最高点位于栗家盖梁，高程为 1755.20m，最低点位于隧道出口附近，高程为 998.70m，相对高差达 756.50m，一般高差在 400~600m，隧址区主要山脊栗家盖梁山脊，走向近东西，与隧道轴线大致平行。

区内植被茂密，居住人口较少，主要分布在栗家盖梁山脊两侧 1250m 高程以下的沟谷地带，山上人烟稀少，偶有零星住户。

2. 方斗山隧道

石忠高速公路方斗山隧道是石忠高速公路的控制性工程，右洞长 7790 米，左洞长 7590 米，是西南地区最长的隧道。

其主要设计技术标准为：

- (1) 公路等级：高速公路（双洞四车道）
- (2) 计算行车速度：80km/h
- (3) 设计交通量：37734 辆/日。
- (4) 隧道建筑限界：宽 10.5m（单洞）、高 5.0m。

方斗山隧道右洞起止桩号为 K55+305~K62+905，长 7600m，左洞起止桩号为 ZK55+303~ZK62+865，长 7562m。隧道按 B12、B13 两个标段实施，其中 B12 合同段右洞起止桩号 K55+305~K59+100，长 3795m，左洞起止桩号 ZK55+303~

ZK59+100，长 3797m，左右洞通风斜井设于 B12 合同段内；B13 合同段右洞起止桩号 K59+100~K62+905，长 3805m，左洞起止桩号 ZK59+100~ZK62+865，长 3765m。

方斗山特长隧道由东至西穿越方斗山山脉中段，方斗山山脉走向呈北东——南西，山脉全长愈 140km，山体宽一般 4.00~6.00km，山脊高程一般为 1600.00~1650.00m，方斗山主峰高程 1680.30m。方斗山属条形低中山，具构造剥蚀——溶蚀地貌特点。方斗山山脊一带保留有川东平行岭谷地形地貌特征，方斗山山脊东侧及西部坡脚平行山脉走向发育有长数公里至数十公里长条形溶蚀槽谷，溶蚀槽谷分别分布于 1500.00~1550.00m 和 1300.00~1350.00m 和 500.00~600.00m 等高程一带，槽谷底部平缓开阔，串状分布有溶蚀洼地、落水洞、竖井等岩溶形态和景观。方斗山山体两侧坡麓自然斜坡陡峻，坡角达 25° ~30°；方斗山除西侧坡脚仍发育有溶蚀槽谷外，两侧坡脚地形破碎，常为地下水的集中排泄带和地表冲沟源头。

方斗山西濒长江，在方斗山至长江河谷的相邻地段以丘陵为主，具有构造剥蚀——侵蚀地形地貌特征。该区丘陵以中丘、深丘为主，丘顶高程 350.00~500.00m，丘间冲沟发育，切割深度较大，相对高差 150.00~200.00m。

方斗山以东属构造剥蚀——侵蚀低山地貌区，山脊高程 1000.00~1100.00m，龙河支河在隧址区高程为 600.00~620.00m，相对高差达 400.00~500.00m。方斗山特长隧道进口段和部分洞身均布设于上述低山区，而特长隧道出口则位于方斗山西坡坡脚地带。

6.2 运行速度检验

吕家梁和方斗山隧道所处地形复杂，出入口高差较大，且出入口接大量桥梁，并在主线右侧都存在长大下坡，为此，我们选取了两段隧道所处的路段进行了车辆运行速度检验。运行速度计算方法按照《公路项目安全性评价指南》(JTG/TB05-2004) 进行。

1) 吕家梁隧道

吕家梁隧道右洞起止桩号为 K23+779~K30+442，长 6663m，左洞起止桩号为 ZK23+792~ZK30+456，长 6664m。我们选取了 k20+550~k33+700 作为计算桩号范围。

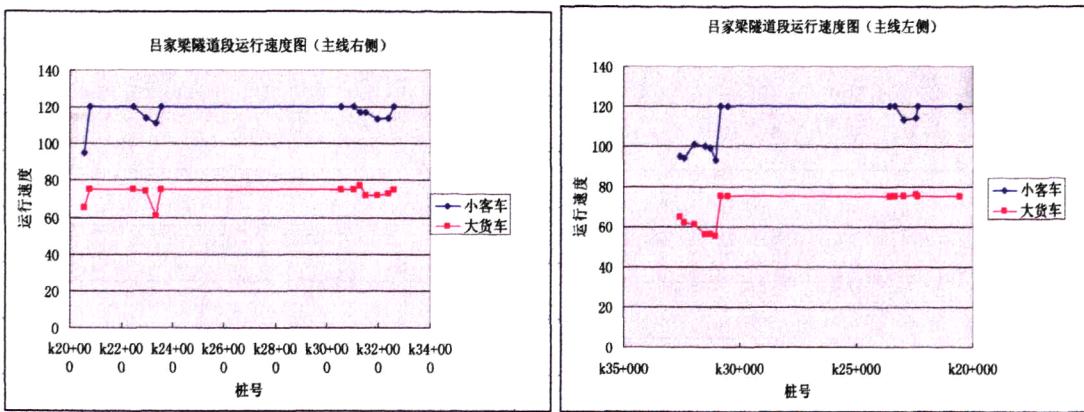


图 6.1 吕家梁隧道运行速度

Fig6.1 Lujiaoliang tunnel Vehicles operating speed

2) 方斗山隧道

方斗山隧道右洞起止桩号为 K55+305~K62+905，长 7600m，左洞起止桩号为 ZK55+303~ZK62+865，长 7562m。我们选取了 k53+200~k65+000 作为计算桩号范围。

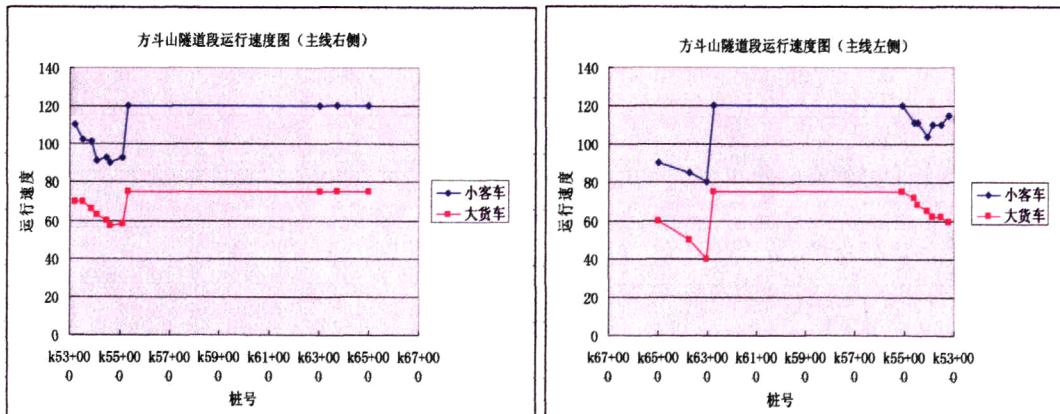


图 6.2 方斗山隧道运行速度分析

Fig6.2 Fangdoushan tunnel Vehicles operating speed

3) 结论

1. 吕家梁隧道

主线右侧：

在隧道进口段，车辆运行速度变化不大，在 110-120km/h 之间，进入隧道时车速较高。隧道出口段，为连续长大下坡，且车辆始终保持较高的车速运行，且多大型桥梁，存在一定的安全隐患。

主线左侧：

隧道进口段，因为整体呈上坡，因此车速相对较低，但仍以较稳定的速度行驶。隧道出口段，因接一个平曲线半径为 700m、坡度为-4、-2.77 的下坡，小客车速度发生约 10km/h 的变化，存在一定的安全隐患。

2. 方斗山隧道

主线右侧：

隧道进口段，为连续三个小半径曲线，因此运行速度产生了较大变化。隧道出口段，为连续长大下坡，且车辆始终保持较高的车速运行，且多大型桥梁，存在一定的安全隐患。需要注意的是，该隧道洞内坡度较大，因此也加大了出口处在连续长下坡的行驶安全隐患。

主线左侧：

隧道进口段，因为整体呈上坡，因此车速相对较低，但仍以较稳定的速度行驶。隧道出口段，为连续三个小半径曲线，运行速度受到影响，尤其是大货车，速度下降较快。

6.3 限速建议

根据依托工程预测交通量及车辆组成等情况，进行模拟仿真，确定沪蓉国道主干线支线重庆忠县至垫江段：

- 天气良好时基本路段限速值建议为 100km/h；
- 在平曲线最小半径为 411m 处，设置警告标志，提醒驾驶员注意行驶安全，并设置减速标线辅助限速；
- 对于上述两隧道处，天气良好状态下全隧道段限速值建议为 80km/h；

吕家梁隧道：

主线右侧隧道出口段，为连续长大下坡，且车辆始终保持较高的车速运行，且多大型桥梁，存在一定的安全隐患，建议出口处设置减速带。

主线左侧隧道出口段，因接一个平曲线半径为 700m、坡度为-4、-2.77 的下坡，小客车速度发生约 10km/h 的变化，建议出口设置减速带。

方斗山隧道：

主线右侧隧道进口段，为连续三个小半径曲线，因此运行速度产生了较大变化。隧道出口段，为连续长大下坡，且车辆始终保持较高的车速运行，且多大型桥梁，存在一定的安全隐患。需要注意的是，该隧道洞内坡度较大，因此也加大了出口处在连续长下坡的行驶安全隐患，建议设置减速带。

主线左侧隧道出口段，为连续三个小半径曲线，运行速度受到影响，尤其是大货车，速度下降较快，建议设置减速带。

- 限速标志等警告标志在洞外及洞内弯道、下坡等特殊路段前 150—200m

- 范围内设置；
- 相邻路段限速差值不大于 20km/h，限速区间不小于 2km。

第七章 结论与展望

7.1 本论文的主要研究成果包括

- 1) 通过调研数据, 分析了驾驶员对路段和隧道行驶的限速期望值;
- 2) 分析了基于安全车速的交通流参数关系, 建立了安全车速与车辆组成、交通量之间的函数关系;
- 3) 对特殊路段进行了分析研究;
- 4) 建立了基于驾驶行为的限速模型;
- 5) 利用 vissim 软件对广东石门坳隧道进行仿真, 验证限速模型, 并提出了限速建议值;
- 6) 对依托工程进行了限速值建议。

7.2 论文得出结论

- 1) 限速条件对驾驶员车速的选择个体差异性较大;
- 2) 限速值有逐步提高的趋势;
- 3) 不同限速值对车流的影响较大, 合理限速至关重要。
- 4) 隧道限速可采用分车道限速或可变限速;
- 5) 对于新修建的高速公路隧道, 最高限速值应不低于 80km/h;

7.3 下一步应解决的问题

- 1) 驾驶行为的深一步研究;
- 2) 隧道限速方法的探讨;
- 3) 特殊路段对车速影响的量化研究;
- 4) 基于安全车速的交通流参数关系进一步优化。

致 谢

本论文是在导师韩直（博士、研究员）的悉心指导下完成的。两年多的研究生学习期间，韩老师无论是生活上还是学习上都给予了我无私的帮助。恩师渊博的学识、严谨的治学态度、“与人为善、惠而不费”的为人处事，使我深受教诲，受益匪浅。韩老师的言行身教、学者风范，必将指引我以后的人生道路。在此，向您致以深深的敬意和衷心的感谢。

在实习与本论文撰写的过程中，得到了重庆交通科学研究院交通工程所周健、王小军、马璐、郭兴隆、付立家等人的热情帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

另外，我还要感谢我的师兄张志红、杜益文、李家龙和杭力，同门曾祥平、邓敏和闫桂梅，师弟师妹陈晓利、杨院、倪健、白云、田登、游婷、罗鑫权、廖和将等，还有我的舍友和同学们，认识你们是我一生中最大的财富。

最后，我还要衷心地感谢我的父母和家人，是他们默默地操劳，无私的奉献，使我走到了今天，走向明天。

参考文献

- [1] 交通部公路科学研究所 等. 重庆高速公路安全运行控制管理研究[R]. 2007.
- [2] 裴玉龙, 马骥. 道路交通事故道路条件成因分析及预防对策研究. 西安: 中国公路学报, 2003.10.
- [3] Ruediger Lamm, Basil Psarianos, Theodor Mailaender. Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. R.R. Donnelley & Sons Company. 1999: 9.23~9.56, 8.3~8.4, 8.31, 6.4.
- [4] 范士儒. 交通心理学教程. 中国人民公安大学出版社. 2005.02.
- [5] 王武斌 等著. 道路交通系统中驾驶行为理论与方法. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 司银霞. 限速标志对驾驶行为影响研究[D]. 吉林大学, 2006.
- [7] 于增壳. 基于仿真环境驾驶员临界反应能力的研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2005.
- [8] 过秀成. 道路交通安全学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.
- [9] Anders Brodin, Arne Carlsson. The VTI Traffic Simulation Model. Sweden: Swedish[J]. Road and Traffic Research Institute 321A, 1986.
- [10] 吉小进 等. 高速公路基本路段 V / C 比与事故率的关系. 公路交通科技, 2003.
- [11] 裴玉龙. 道路交通事故成因分析及预防对策研究[D]. 东南大学, 2002.
- [12] Geogre W. Black JR, Lawrence E. Jackson. Pavement Surface Water Phenomenon and Traffic Safety. ITE Journal. 2000, 2: 32~37.
- [13] 郑柯 等. 高速公路平曲线半径与车辆行驶速度之间的关系分析. 公路交通技术, 2003.4.
- [14] [苏] B·Ф·巴布可夫著, 景天然译. 道路条件与交通安全. 上海: 同济大学出版社, 1990: 42~70, 262~298.
- [15] Ruediger Lamm, Basil Psarianos, Theodor Mailaender. Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. R.R. Donnelley & Sons Company. 1999: 9.23~9.56, 8.3~8.4, 8.31, 6.4.
- [16] 张永生 等. 山区长大下坡对道路交通安全的影响及其工程措施研究. 北京: 交通标准化, 2005.12.
- [17] Veli-Pekka Kalberg. The Two Effects of Speed on Accidents: Number and Severity. TRB 981191.
- [18] Solomon, D. Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Drivers, and Vehicle. Bureau of Public Roads, U.S. Department of Commerce, 1964.7.
- [19] Fildes, B.N., Rumbold, G., Leening, A. Speed Behaviour and Drivers Attitude to Speeding. Report 16, Monash University, Accident Research Centre, Australia, 1991.

-
- [20] 王俊. 公路隧道紧急事件处理系统视景仿真软件开发[D]. 长安大学. 2005.
 - [21] 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 北京: 人民交通出版社. 2003.
 - [22] 重庆交通科研设计院. 秦岭终南山特大公路隧道关键技术研究[R]. 2005
 - [23] 韩直. 公路隧道照明节能技术研究. 2006 年公路隧道运营管理与安全国际学术会议论文集
 - [24] 李长城 等. 公路限速方法及其适用性分析. 北京: 交通科技, 2006.06.
 - [25] 盛彦婷 等. 基于交通安全的高速公路出口区域限速确定方法研究. 交通与计算机. 2006.08.
 - [26] 高林星 等. 山区高速公路限速问题初探. 公路交通技术, 2006. 10.

在学期间发表的论著及取得科研成果

一、发表论文

- [1] 杨继明, 胡兴华, 周广振. 基于 GIS 的交通区位线分析识别系统设计. 西华大学学报, 2007 年第 1 期
- [2] 胡兴华, 周广振, 杨继明. 基于运行图的快速公交运营系统研究. 道路交通与安全, 2006 年第 11 期
- [3] 韩直, 周广振. 雪峰山特长公路隧道监控系统规模评价. 中国交通信息产业, 2007 年第 9 期
- [4] 周广振, 胡兴华, 张协铭. 重庆公路客运发展策略研究. 收录于城市公共交通

二、参与科研项目

- [1] 西部交通建设科技项目“雪峰山特长公路隧道关键技术研究”之子课题五：雪峰山公路隧道监控系统规模论证, 2007.04—2007.05;
- [2] 西部交通建设科技项目“云南省山区公路安全防护研究”立项申请书, 2007.07;
- [3] 西部交通建设科技项目“公路隧道智能联动控制研究”之子课题：高速公路隧道限速研究（毕业论文）, 2007.01—2008.03;