

国家自然科学基金资助项目

高等级公路 交通流理论

*The Traffic Flow Theory
of the High-class Highways*

罗霞等著

西南交通大学出版社

高等级公路交通流理论

The Traffic Flow Theory
of the High-class Highways

罗 霞

霍 娅 敏 杜 进 有

王 清 宇 陈 应 文

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书是我国第一本专题研究高等级公路交通流理论的专门著述,以我国高等级公路混合车流为研究对象,针对交通流微观模型中的宏观参数和微观参数从理论上进行系统的研究。采用实地考察与计算机模拟相结合的手段,应用现代数学和流体力学方法,较为全面和系统地阐述了混合车流条件下高等级公路的交通流特性。本书分为基础理论和应用研究两个层次,其主要内容有:混合车流条件下高等级公路系统分析(研究范围界定、人车路分析等);混合车流的车流理论研究(交通流特性分析、跟车和超车理论);三大参数的关系(国外标准车流的研究成果、混合车流三大参数关系的诺模图及关系式);车头间距分布规律的研究(数学模型及研究成果);立交车流运行模式研究(合流理论、复合运动模式);通行能力和综合服务水平的研究;匝道调节器设置的数学模型和收费系统的研究等。

本书可作为交通工程、道路工程等专业的研究生教材和教学参考用书,也可供从事桥梁工程、市政工程、公路及交通工程设计、施工和管理的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等级公路交通流理论 / 罗霞等著. — 成都: 西南交通大学出版社, 1999.12
ISBN 7-81057-375-6

I. 高... II. 罗... III. 公路, 高等级 — 交通流 — 理论研究 IV. U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 51738 号

高等级公路交通流理论

罗 霞 等著

*

出 版 人 宋绍南

责任编辑 李英明

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

成都市报华印装厂印刷

*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 8.375

字数: 198 千字 印数: 1~2030 册

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-375-6/U · 075

定价: 18.00 元

作者简介

罗霞，女，1962年7月生于重庆，西南交通大学教授，博士。主要从事交通工程研究，涉及高速公路、城市交通和综合运输等领域，著有《高速公路立体交叉规划与设计》一书。曾赴德国研修一年，担任过亚洲发展银行高速公路项目咨询专家。主要学术兼职：国家计委综合运输研究所特约专家，四川省国际咨询公司特聘专家，省交通厅核心专家组成员；南京、杭州等市公安交通管理局顾问；四川省公路学会、省交通工程学会、省城市科学研究会理事、成都市公路学会副理事长。

前 言

改革开放以来,我国公路建设,特别是高等级公路建设,成就引人注目。按照新建与改造、普及与提高相结合的发展方针和以高速公路为主的“五纵七横”12条国道主干线的发展规划,“八五”期间,公路等级和质量都有了很大的提高,汽车专用公路达20000 km,其中高速公路达到3422 km。“九五”期间公路建设以提高水平为主,加大高等级公路的比重,去年底已建成高速公路6258 km,居世界第七位。在国道主干线总里程35200 km中,今年建成和在建的可达6930 km。在2002年前要建成的“两纵两横,三个重要路段”七条公路共16700 km,今年建成和在建的将达90%。全国在建总规模27900 km,其中高速公路15784 km,我国国道高等级公路主骨架网正在加快形成。

交通流理论是高等级公路规划、设计和管理的理论基础。实践的发展对理论研究提出了客观要求。不同车种组成的混合车流构成了我国高等级公路交通流的基本特性,研究混合车流条件下高等级公路交通流特征和分布规律,不仅对其规划和运营管理十分必要,而且对促成符合国情的、统一的高等级公路交通流理论体系的建立和形成具有重要的意义。

目 录

第一章 概 述	1
第二章 高等级公路系统分析	4
第一节 研究范围的界定.....	4
第二节 公路系统分析.....	5
第三节 交通条件分析.....	5
第四节 人一车系统分析.....	6
第五节 车辆制动特性分析.....	8
第六节 车辆动力性能分析.....	11
第三章 车流理论研究	13
第一节 混合车流交通流特性分析.....	13
第二节 跟车理论.....	18
第三节 超车理论.....	21
第四章 三大参数关系的计算机仿真	23
第一节 三大参数的基本关系.....	23
第二节 国外交通流模型.....	24
第三节 混合车流模拟模型的设计.....	25
第四节 三大参数关系诺模图及走势分析.....	27
第五节 曲线拟和检验.....	29
第五章 车头间距分布规律的研究	30
第一节 车头间距数学模型.....	30
第二节 计算机模拟.....	31
第三节 模拟结果及分析.....	33
第六章 立交车流运行模式研究	37
第一节 立交车流运动图示.....	37
第二节 分流运动描述.....	38
第三节 合流运动的理论和模拟.....	39
第四节 车流的复合运动.....	50
第七章 通行能力和服务水平的研究	55
第一节 通行能力的研究.....	55
第二节 高等级公路服务水平的确定.....	59
第三节 综合服务水平的确定.....	60

第八章 匝道调节器设置的数学模型	63
第一节 合流区车流运行模式与匝道调节方式	63
第二节 模型的构造	65
第九章 收费系统	69
第一节 车流到达分布	69
第二节 车流排队模型	70
第三节 收费系统模拟	71
第四节 模拟结果分析	73
第十章 主要成果	76
主要参考文献	77
后 记	79
English contents	80
1、Analysis on Mixed-traffic Flow's Characteristics	80
2、Study on the Relationship of Flow-speed-Density of Mixed-traffic Flow	86
3、Study on the Distribution Pattern of Vehicle's Time Headway	93
4、Research of Confluence Movement Model under Mixed-traffic Flow	98
5、The Model and Improving Design Research of the Complex Movement of the Traffic Flow	104
6、Study on the Carrying Capacity of Mixed-traffic Flow	110
7、The Mathematical Model for Installment of the Ramp on the High- class Highways	114
8、Simulation of High-class Highways Toll System under the Condition of Mixed-traffic Flow	121

第一章 概 述

一、国外交通流理论的发展概况

交通流理论是运用数学、物理学和力学的原理描述交通流特性的一门边缘学科,其目的是为了阐述交通现象形成的原理。1933 年金蔡 (Kinzer) 首次论述了泊松分布应用于交通的可能性;随后在 1936 年,亚当斯 (Adams W.F.) 发表了数值例解,表明交通流理论研究的起步。1950 年初莱特赫 (Lighthill) 和惠特汉 (Whitham) 论述了车流与密度的关系;两位学者又于 1955 年提出了流体动力学模拟理论;1950 年赫尔曼 (Herman) 博士运用动力学方法,并用数学模式加以表达提出了跟车理论;1960 年在通用汽车公司的支持下这位学者和罗瑟瑞 (Rothory) 一同进行了车流理论的扩展研究;这些研究标志着近代交通流理论研究的真正开始。

从单一概率论方法的应用到数学、物理学方法和力学方法的综合应用,表明伴随 50 年代欧美诸国工业化趋于高度发展的汽车时代的来临,公路交通流快速增长且干扰增大,各车的独立性越来越小,于是跟车理论、交通波理论和车辆排队理论相继出现。1959 年 12 月在美国底特律召开的第一届国际交通流理论学术会议宣告了交通流理论的诞生。随着汽车工业迅速发展和汽车在家庭中逐渐普及,汽车保有量急剧增加,人类活动时空间观有了根本的转变。与此同时,从 50 年代中期起,美、英、法、德和日本等国家开始大规模修筑高速公路,道路交通不仅在城市中充分显示了自身的优势,而且在中、长距离中以其灵活、直达和高效的优势在竞争中崛起,突破了铁路为中心的陆上运输格局,引起了运输结构的大调整。在这一期间,伴随道路交通尤其是高等级公路的发展,交通流理论进入了一个迅速发展的时期。1975 年由丹尼尔 (Daniel L.G.) 和马休 (Matthow J.H.) 出版的《交通流理论》一书,全面、系统和综合地阐述了交通流理论的研究成果。

随着公路交通量骤增、交通事故频繁,交通堵塞日益严重。由于受到资金、土地和环境等条件的制约,一些发达国家从大规模的建路转向怎样充分挖掘现有路网潜力和综合利用的研究上。从 70 年代中期起,交通流理论逐渐由纯理论研究转向应用研究。由于理论上的重要发现和研究成果已不多见,研究课题也随着具体的应用而逐渐分散,应用研究则偏重于高科技和车流的结合上。运用现代科学技术寻找出路,改变和拓宽了人们的思路。80 年代中后期,美、日和欧洲几乎同时推出公路交通高科技的跨世纪工程。1994 年在日本横滨召开的国际学术会议正式将美国提出的智能交通运输系统 ITS (Intelligent Transportation System) 作为高科技项目的统一名称,高科技应用于公路交通成为当今世界性的热门课题之一,并且正在形成一个新兴的高科技产业。

二、研究意义和国内外研究现状

高等级公路是为机动车提供高速度、大交通量和高服务水平的道路交通设施。目前,我

国建设高等级公路主要是为满足城市之间日益增长的客、货运输需要,以提高运输效率。

如前所述,国外(以发达国家为代表)以小车流为基础的交通流理论已经建立,并广泛应用于高等级公路的规划、设计和管理,其中尤以美国、日本等发达国家高速公路的研究成果最为突出。从80年代起我国高等级公路建设发展较快,但对交通流参数的描述和特性的研究大多采用国外以小车流为基础建立起来的理论,未能客观地反映我国高等级公路上交通流的构成特征,研究方向主要集中在规划与设计方面。

国外交通流的构成以小车占绝对优势,因此,以小车为基础的交通流理论符合实际车流状况,正确揭示了运行过程中交通流参数之间的关系。目前,我国高等级公路交通构成是不同车型的混合交通,不同车型的混合车流构成我国高等级公路交通流的基本特性,如果简单套用小车流的参数则不能客观反映车流运行规律。关于车头间距分布的研究,未形成不同车型的混合车流下车头间距分布规律,难以正确推算高等级公路的通行能力。对高等级公路的规划与设计,尤其在通行能力计算、合流、分流、交织区及收费站等特殊部位设计中,目前国内大多采用国外的规范和标准,未能考虑混合车流在运行过程中速度和车身尺寸的差异。因此照搬和套用国外的设计参数不能为混合车流提供象小车流一样的服务水平和运行条件,而国内外目前对不同比例交通构成条件下交通参数的描述和交通特性的分析均未作过深入系统的研究。

三、研究思路及技术路线

采用实地观察与检测和计算机模拟仿真等实验手段,并运用现代数学和流体动力学分析高等级公路交通流在不同车种比例和不同密度组合条件下的特性及各项参数之间的关系。其技术路线如下:

1. 实地观测在一定总流量和交通构成条件下,所能实现的速度和车头间距。用流动车法可得到实验路段不同车种的车辆数、行程时间和行驶车速,同时可观察到不同车种比例下的超车运行状况和连续车流的分布状态;用定点观察法可测到单位时间内通过断面不同车种的流量和车辆的地点车速;不同车种比例下合流、分流、交织、交汇区流量的运行状态和不同车种的可接受间距;用摄影法可得到公路上瞬间车辆运行状态。用以上方法采集的数据,推算出试验路段不同车种的车辆数、速度、密度、和车头间距等参数。

2. 用计算机仿真模拟高等级公路在不同车种比例和密度组合条件下交通流的运行状态。实地观测法只能测定特定条件下高等级公路交通流参数,为构建模拟模型提供了条件,模拟不同组合条件下的交通状况,可得不同车种比例的交通参数。

3. 理论分析得到交通参数的基本关系、车流分布规律和特殊部位的运行参数。根据实地观测和计算机仿真所得到的交通流运行状态的基本数据,借助概率统计方法对各种组合情况下的交通参数进行归类分析处理,并应用力学原理和数学方法加以表述,建立参数之间的关系模式。

四、研究特色和拟解决的关键问题

本书研究高等级公路不同车型比例下混合车流的交通流理论,其特色主要表现在以下三个方面。

1. 小车流和混合车流存在不同速度分布和车身尺寸的差异。小车流理论取车流平均

速度和某型小车为特征。国外交通流理论是建立在这种研究基础之上的。我国高等级公路混合车流的构成较为复杂,且对同一车种而言,不同厂家、不同时期、不同型号的车辆都有所不同(起动、制动、反应等时间,车身尺寸的差别),不能简单采用小车研究的处理方法,当然也不能简单套用国外小车流理论。

2. 城市道路和高等级公路具有不同的运行特征。城市道路交通流呈现间断性特征,其车流的运行常受到一些规定操作地点的控制(如交叉口、信号、路口标志等),断面交通构成成为机动车与非机动车混合行驶,路口间距也是影响其通行能力的重要因素。高等级公路由于没有横向干扰,车辆在规定的出入口进行流量分配,杜绝非机动车进入,减少了不同速度的车辆间的纵向摩擦。因此,高等级公路在一定的密度范围内提供稳定的连续交通流运行模式,其交通流参数间的关系和分布规律不同于城市道路交通流。

3. 国内外对公路交通流理论研究较少,未形成统一的理论体系。对高等级公路不同车种形成的混合交通,无论其大小和车种比例如何构成,均采用变换系数的线形处理方法,未能完整地揭示混合车流交通参数的相互关系。

本书拟解决的关键问题分为基础理论和应用研究两个层次,包括混合车流条件下交通流参数关系研究、车头间距分布规律研究、交通流特性分析、通行能力计算、立交车流分布模式的研究、匝道调节器设置数学模型和收费系统研究等。其中前三项是本书拟解决的关键问题,为应用研究提供理论基础。本书试图从定性和定量两方面寻求不同车种比例对交通流运行状态和交通流的动态特征的影响,并通过应用研究,探讨在不同运行状态下交通流对道路设施的要求,为高等级公路的规划、设计和管理提供理论依据,以提高高等级公路运输的效率和安全性。

第二章 高等级公路系统分析

高等级公路系统由道路系统、交通系统、人一机系统和环境系统所组成,确切地说,是由高等级公路路段、车流转换的立体交叉、车流运行的控制系统、混合车流、驾驶员及其他附属设施共同组成的一个动态大系统。系统组成图如下所示:

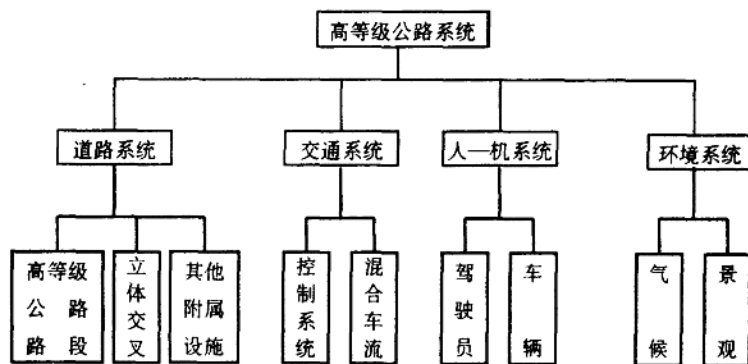


图 2-1 高等级公路系统组成图示

第一节 研究范围的界定

混合交通指不同车型的组合。如果按照传统方式采用将大车按一定比例换算为小车的处理方法,将混合车流变换为小车流,这意味着大车对交通流运行的影响是线性的,即:

$$X = a \cdot Y + Z \quad (2-1-1)$$

式中: X —— 换算后的小车数;

a —— 大车换算为小车的当量系数;

Y 、 Z —— 分别为换算前大车、小车的数量。

我们认为这种变换未能全面反映我国高等级公路不同车型比例下交通参数之间的内在关系及其相互影响,下面分析在不同车型比例下的三种交通构成对交通参数的影响。

(1) 当小车比例为 80% 时,即交通的构成以小车为主体,则此时的交通参数的取值可采用小车流理论,并结合我国现有的变换系数方法将大车进行折算。

(2) 当大车的比例为 80% 时,大车作为交通流的主体,此时可按第一种方法将大车作为标准车类似处理。

(3) 当大车与小车构成比例在 80%~20% 之间时,此时随着构成比例的不同,大车与小车之间的相互摩擦增大。这种情形可描述为:当交通密度低时,车头间距大,则车流相互

影响小，小车流与不同车型的混合车流分布模式差异不大；而随着密度的增加，不同车型构成的混合车流不能象小车流那样能保持较为均匀的速度分布，加之车身尺寸差异大，交通参数离散度大。交通参数是大车与小车比例的函数。由此可知，当大车与小车构成比例在此范围内变动时，大车对交通运行全过程的影响呈现非线性型和不平衡性。

鉴于上述分析，本章重点研究大车与小车比例在 80%~20% 之间的交通构成下，交通参数的取值和交通流的特性。

第二节 公路系统分析

公路系统由基本路段、立体交叉和附属设施组成。

按照有关国际组织 1980 年批准的《国际高速公路基本技术和设计标准》规定，一般来说，高速公路是至少具备 4 个车道、设有中央分隔带、全部设置立体交叉和全部控制出入的汽车专用道路。本书的高等级公路指一级全封闭四车道分向行驶的公路和高速公路。在公路设施建设时，车道和路肩宽度对交通流有显著影响，尤其在混合车流交通流中，由于不同车型的车身宽度差异，车道狭窄会导致行驶车辆在纵向的摩擦力增大，特别在超车过程中车流运动会受到限制，驾驶员只能寻找较大的纵向空隙来维持车流运动的平衡。因此在混合车流条件下高等级公路车道的宽度原则上均应按大车尺寸进行设计，包括停车带，其转弯半径和弯道加宽，尤其是立体交叉的匝道半径和加宽在设计时应特别注意。

关于公路技术标准及适应流量，按照 1998 年 1 月 1 日实施的 JTJ001-97《公路工程技术标准》，其主要指标如下：

表 2-2-1 公路工程技术标准 (摘要)

公路等级	高速公路*			一级公路	
地 形	平原 微丘	重丘	山岭	平原 微丘	山岭 重丘
设计车速 (km/s)	120	100	80/60	100	60
行车宽度 (m)	2×7.5	2×7.5	2×7.5/ 2×7.0	2×7.5	2×7.0
路基宽度 (m)	28.0/27.50	26.0	24.5/22.5	25.5	22.5
极限最小半径 (m)	650	400	250/125	400	125
· 停车视距 (m)	210	160	110/75	160	75
最大纵坡 (%)	3	4	5/5	4	6
适应流量 (万辆/日)	4.0~5.5	3.5~5.0	2.5~4.5	1.5~3.0	

* 本书主要研究四车道高等级公路的流量特性，故此处只列出了四车道高速公路技术指标，随着我国高速公路建设的发展，已出现了六车道高速公路，关于六车道和八车道高速公路各项指标，请见 JTJ001-97 标准。

第三节 交通条件分析

交通条件主要指车型组成、车道划分和车流运行状况。混合车流是我国高等级公路的基本特征，在混合车流条件下，车型的组成较为复杂且随时间的变化呈现随机性，由于混合车

流中各车之间车身尺寸和动力特性的差异, 大车比小车占用更多的道路空间, 加之运行性能比小车差, 在许多情况下, 不能与小车保持紧跟状态, 因而, 在交通流中形成的许多车辆间大空隙也难以由超车运行填补, 这就产生了道路空位在使用上的无效, 这种空间的损失随车型比例而变化, 在超车运动时, 无疑大车要求更大的横向距离来保证安全, 所以, 混合交通流在纵向和横向运动中与纯小车流相比, 最大的特点是相互间的干扰增大, 有时需保持比规定的纵向和横向间距更大的距离来维持交通流的平衡。

混合车流的这种特性在车队运动、分流、合流和交织运行中表现尤为突出。因此, 对混合车流进行纵向、横向诱导, 以及可接受间隙的测定时, 应特别注意。

第四节 人一车系统分析

公路交通是人、车、路构成的藕合系统, 这个系统具有实现人、物位置转移的功能, 实现运行安全从本质上讲是实现这个系统的协调。而人一机(驾驶员—汽车)系统仅涉及单个驾驶员和一辆汽车, 在汽车正常情况下, 人一机系统的安全化功能在于实现驾驶员和车辆的最佳匹配。

一、驾驶员特征分析

交通流特征的描述离不开对人的特性分析, 在构造交通运行模型时直接或间接地涉及到人的特性。由于高等级公路杜绝行人上路, 因此, 驾驶员成为主要研究对象。众所周知, 置身于高等级公路环境中的驾驶员, 由于汽车的行驶速度很快, 加之混合交通, 面对的交通环境更为复杂, 在瞬间需处理的信息量比一般公路成倍增加, 这就要求行驶在高等级公路上的驾驶员具有较强的处理信息的能力。

驾驶员接收信息和处理信息的能力具有很大的随机性, 因此, 驾驶员的特征通常用期望值和最不利情况来表述。

二、驾驶员工作的目标及任务

驾驶员作为由人、车、路三大要素组成的高等级公路系统中最具支配地位的因素, 其工作目标就是以一种安全而有效的方式把他的车辆从出发点开到目的地。为实现这一目标, 驾驶员需要在驾驶过程中完成以下任务:

- (1) 选择一参考系, 以便确定车辆是否在时间、空间上有偏移;
- (2) 查明偏移并确定偏移标准;
- (3) 及时调整车辆的状态, 以使这些偏移不超出规定标准。

驾驶员的任务就是准确而及时地完成贯穿于整个过程的这一系列活动, 图 2-4-1 表述了这种过程。

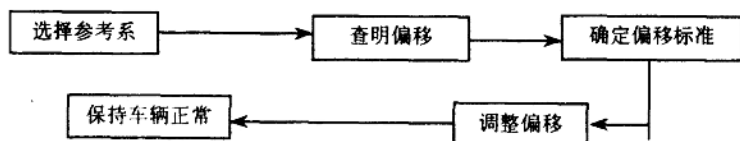


图 2-4-1 驾驶员正常工作过程图

三、驾驶员信息处理过程及可靠性分析

驾驶过程可简化为信息输入、加工、决策及信息输出这样一个不断往复进行的信息处理过程,如图 2-4-2 所示:

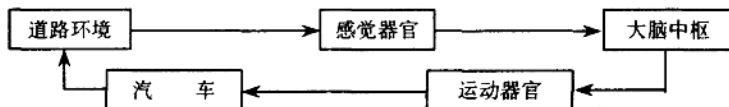


图 2-4-2 驾驶员信息处理过程示意图

可以看出,驾驶员是上述串联系统的主要环节,是人—车—路综合系统的核心。

假设驾驶员的可靠性为 R_1 ,车辆的可靠性为 R_2 ,道路的可靠性为 R_3 ,则整个高等级公路系统的可靠性 R 可表示如下:

$$R=R_1 \times R_2 \times R_3 \quad (2-4-1)$$

显然, R_2 、 R_3 的可靠性纯属于技术问题,随着高等级公路规划、设计、建设实践活动及整个汽车工业发展水平的不断改善和提高,车、路的可靠性能逐渐得到保证, R_2 、 R_3 的可靠性趋近于 1,因此,整个高等级公路系统的可靠性 R 主要取决于驾驶员的可靠性 R_1 。

现引入信息论中通道容量概念,通过分析其影响因素,提出提高驾驶员的可靠性 R_1 的措施。通道容量指单位时间内接收、传递和处理信息的能力,目前,人类通道容量的极限值尚难以量化,但信息过载时,会发生以下情况:① 信息丢失;② 信息歪曲;③ 信息反应严重滞后。由于汽车高速行驶时,车外环境瞬息万变,势必会出现信息过载情况,过载部分若是重要信息,则人的可靠性严重降低,导致事故发生;另外,当信息量过小时,尤其是高等级公路上道路平直,车辆稀少,景观变化少,司机操作动作少,使感觉机能下降,也会导致事故发生。

由于高等级公路车速较高、车辆较多,为提高驾驶员的可靠性 R_1 ,首先要进行高等级公路驾驶培训,以适应高速行驶时在生理、心理上的差异;其次,由于大、小车型固有的性能差异,因此驾驶的车型要相对稳定,不宜频繁更换大、小车型;另外要合理、科学地安排驾车时间,以防止疲劳驾驶。

四、反应时间分析

反应时间因驾驶员、行车速度等因素的变化而不同,美国 AASHTO 经多年研究,得出反应时间与驾驶员单位时间内获得的信息呈图 2-4-3 所示关系:

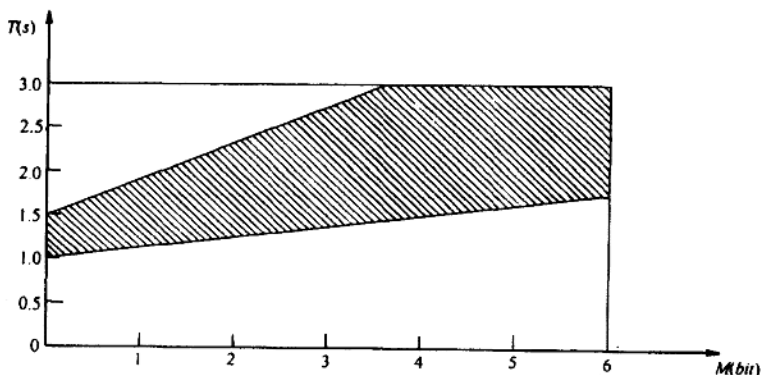


图 2-4-3 反应时间与驾驶员单位时间内信息关系图

日本道路工作者经多次试验, 得出反应时间一般在 0.52~1.34 秒之间。借鉴国外所做的研究, 本文认为反应时间主要因车型及速度而异, 因而在计算中按下式取值:

反应时间 $T(s)$ =

1.0

$v \leq 40\text{km/h}$

小车

$1.0 + (v - 40) * 0.005$

$v > 40\text{km/h}$

小车

1.2

$v \leq 40\text{km/h}$

大车

$1.0 + (v - 40) * 0.006$

$v > 40\text{km/h}$

大车

(2-4-2)

五、高等级公路行车中的行为变异

高等级公路具有车速高、车流量大及无交通信号控制等特点, 与普通公路行车相比, 驾驶员行为有一定的变化, 尤其在以下几方面有显著差异:

1. 视力的降低。以眼睛和观察对象的动、静关系不同, 可以将视力分为静止视力、物动视力、全动视力。驾驶行为中的视力主要是全动视力, 附加一定量的人动视力。据研究, 行车速度达 60~70 km/h 时, 驾驶员的全动视力将比行车速度达 30 km/h 的全动视力低 10%~20%。

2. 水平视野的缩小和前方注意点的远离。车速与水平视野前方注意点相互关系的变化情况大致如下:

表 2-4-1 车速与水平视野前方注意点相互关系

车速 (km/h)	40	60	80	95	105
水平视野 (度)	90~100	75	60	40	<40
前方注意点 (m)	180	330	420	540	60

3. 车速和车间距的误判。据美国的试验, 当高速行驶时, 驾驶员判断的车间距和车速均比实际值小, 而且随着车速的增高, 这种判断误差越大, 从以下两表可见一斑:

表 2-4-2 车速判断试验结果

试 验 条 件	估计车速为 60 km/h 时的实际车速 (km/h)	误 差 (%)
以 100 km/h 持续行驶 5 秒后减速	66.7	11
以 100 km/h 持续行驶 30 km 后减速	75.7	26
以 120 km/h 持续行驶 30 km 后减速	80.1	32

表 2-4-3 车间距判断试验结果

速 度 (km/h)	80			100		
实际的车头间距 (m)	30	91	152	30	91	152
判断的车头间距 (m)	21	35	85	15	40	64

第五节 车辆制动特性分析

一、静态特性

静态特性主要指车辆在静止状态下的一些特性参数, 详见表 2-5-1。

8

表 2-5-1 车辆静态特性参数

车种别	最优灵敏因素	聚 类 类 别		
轿车	排气量	<1.3*	(1.3 4.5)	>4.5
客车	座位数	<15	(15 35)	>35
货车	载重量	<2.5	(2.5 6)	>6

* 指最优灵敏因素对应指标值, 如<1.3指轿车排气量小于或等于1.3。

二、动力学特性

动力学特性指车辆受力与其运动状态间的关系特性, 结合以混合车流为研究对象这一实际情况, 主要以车辆性能为参数, 对车辆制动特性进行分析:

1. 制动过程分析。制动过程包括三个阶段: 第一阶段为驾驶员制动反应阶段(见第二章第四节分析)。第二阶段为制动器起作用至车轮抱死拖滑, 这一阶段制动力不断增长, 制动距离决定于制动力的增长率、地面附着力的的大小和前后制动力的分配状况。第三阶段为车轮抱死拖滑至汽车停止, 制动距离决定于地面附着系数。

2. 制动距离算法分析:

(1) 传统制动距离算法。传统制动距离算法主要有两种:

● $s = v_0 / [254(\phi \pm i)]$, 该式虽然简洁明了, 但由于 ϕ 值为一变量, 而实际计算时按定值取, 因此计算误差较大。

● 以实际观测到的数据做回归分析, 得出分三种车型的经验公式, 但是该式并未考虑如何对道路条件加以修正, 因而也是不完善的。

(2) 车辆制动距离的计算机模拟算法。鉴于传统制动距离算法的不足, 从汽车运动微分方程着手, 通过计算机模拟, 建立制动距离与车辆特性、道路特性及速度间的关系。

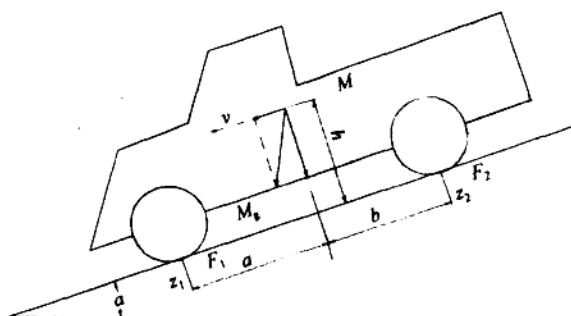


图 2-5-1 汽车制动模型

● 数学模型:

如图 2-5-1 所示, 设一重量为 G 的车在坡度为 α 的斜坡上制动, F_1 、 F_2 为前后轮的制动力, 忽略空气阻力及车轮滚动阻力, 则汽车制动的微分方程可表示为:

$$M \frac{dv}{dt} = Mg \sin \alpha - F_1 - F_2 \quad (2-5-1)$$

将制动力 F 表示成车轮荷载 Z_i 与地面附着系数 ϕ_i 的乘积

$$\begin{cases} F_1 = Z_1 \phi_1 \\ F_2 = Z_2 \phi_2 \end{cases} \quad (2-5-2)$$

附着系数 ϕ_1 、 ϕ_2 为前、后轮滑移率的函数。

根据图中受力，取动平衡前、后轮荷载为：

$$\begin{cases} Z_1 = \left(Mg \cos \alpha * b + Mg \sin \alpha * h - M \frac{dv}{dt} * h \right) / L \\ Z_2 = \left(Mg \cos \alpha * a - Mg \sin \alpha * h + M \frac{dv}{dt} * h \right) / L \end{cases} \quad (2-5-3)$$

式中： a —— 汽车质心至前轴距离；

b —— 汽车质心至后轴距离；

h —— 汽车质心的高度；

L —— 汽车的轴距， $L=a+b$ 。

综合上述三式得制动微分方程为：

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{Lg \sin \alpha (\phi_1 b + \phi_2 a) + hg \sin \alpha (\phi_2 - \phi_1)}{L - h(\phi_1 - \phi_2)} \quad (2-5-4)$$

当前后轮抱死拖滑时，制动微分方程为：

$$\frac{dv}{dt} = g(\sin \alpha - \phi_0 \cos \alpha) \quad (2-5-5)$$

此时 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_0$ (ϕ_0 为滑动附着系数)，制动减速度与汽车参数无关。

从式(2-5-4)可以看出 ϕ 是一个未定参数，主要由车轮滑移率确定，同时还与车速等因素有关。

● 应用分析：

依上述数学模型为基础，通过变换初始条件，可得到制动距离与速度、车重、附着系数和坡度等的相互关系。

(1) 不同初速、不同坡度、不同车型下的制动距离计算：

表 2-5-2 不同初速、坡度、车型下的制动距离计算表 (单位：m)

速度 (km/h)	车 型	坡 度 (%)				
		5	2	0	-3	-6
30	小车型	5.5	5.7	6.0	6.2	6.6
	大车型	7.2	7.5	7.8	8.2	8.7
40	小车型	5.8	10.1	10.3	11.0	11.7
	大车型	12.8	13.3	13.9	14.6	15.5
50	小车型	15.3	15.8	16.4	17.2	18.3
	大车型	20.0	20.8	21.7	22.8	24.2
60	小车型	22.0	22.8	23.6	24.8	26.4
	大车型	28.8	30.0	31.2	32.8	34.8
70	小车型	29.9	31.0	32.1	33.8	35.9
	大车型	39.2	40.8	42.5	44.6	47.4
80	小车型	39.1	40.5	42.0	44.1	46.9
	大车型	51.2	53.3	55.5	58.3	61.9
90	小车型	49.5	51.3	53.1	55.8	59.4
	大车型	64.8	67.5	70.2	73.8	78.3
100	小车型	61.1	63.3	65.6	68.9	73.3
	大车型	80.0	83.3	86.7	91.1	96.7