

## 摘要

高速公路安全高效的运作依赖于合理的设计、规划和管理，传统的经验实测法和理论分析方法能解决一些问题，但由于高速公路系统复杂的道路和交通条件，两者都有其巨大的局限性；交通仿真克服了传统方法的局限，为高速公路的研究提供了一种新的高效便利的研究手段。交通仿真能直观高效地研究高速公路交通状态，具有节省费用、安全、快速、研究范围广、可控制、可重复等优点。

本文的主要研究内容是高速公路系统动态交通流的仿真。文中首先分析了车辆在高速公路基本路段、匝道、收费站的交通流运行特性；然后结合国内外相关的交通仿真研究成果，对相应的车辆生成模型、车辆跟驰模型、换车道模型、收费站模型等进行了分析、对比、评述；在此基础上设计开发高速公路动态交通流仿真系统；仿真系统由输入模块、仿真模块、输出模块三个部分构成了整体框架，在各模块中选择了合适的交通仿真模型，并对各模块内部的仿真模型进行了具体描述；利用 VC++编程语言编写高速公路系统动态交通流仿真程序，设计仿真程序应用方案，利用仿真系统对高速公路入口匝道进行仿真实验，将实验数据绘制成流量—速度、密度—流量、密度—速度散点图，探讨高速公路合流区汇入车辆对主线内、外侧交通运行的影响。

**关键词：**高速公路系统 基本路段 匝道 收费站 交通仿真

# ABSTRACT

To operate the expressway safely and efficiently depends on rational design, programming and management. The traditional methods such as experience field measurement and theoretical analysis can deal with some issue, but because of the complex traffic condition of the expressway systems, the scope they can manage is highly limited. The traffic simulation is able to study the complex expressway traffic situation intuitively and efficiently. It has many advantages such as saving costs, safe, rapid, able control, repeated and so on.

The main content of this paper is the simulation of traffic in expressway systems. The paper analyzes the characters of vehicles moving on the different part of expressway systems such as basic segment, ramp and tolling plaza. Combined with the simulation research achievements abroad and domestic, the correlative simulation models such as vehicle creation, tracking, changing lanes, tolling plaza and so on, are analyzed, compared and commented. Based on that, the expressway simulation systems are designed and developed. The main frame of simulation systems is composed by input module, simulation module, output module. The traffic models that adopted in the former three modules are described and improved. The expressway traffic simulation program is complied by VC++ programming language. Do some experiments on the expressway merging-area by the program and the experiments data are used to drawing points-figure. Discussing how the converging vehicles in the ramp affect the vehicles in the basic segment.

**Keywords:** Expressway systems ; Basic segment ; Ramp ; Tolling Plaza ; Traffic Simulation

## 东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: 朱凌 日期: 2006.4.7

## 东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: 朱凌 导师签名: 邬志刚 日期: 2006.4.7

# 第一章 绪论

## 1. 1 研究背景

高速公路的产生是经济与社会发展的客观需要，也是交通运输现代化的迫切需要。由于其自身的特点，高速公路适合大流量快速客货运输。它的发展为推动社会进步、振兴国家经济、促进运输结构日臻完善，起了巨大的作用。

高速公路安全高效的运作依赖于合理的设计、规划和管理，因此这方面的研究是交通工程领域研究的一个重要内容。传统的研究方法有经验实测方法、理论分析方法。经验实测法的基本数据都来源于实际现场，有很大的可信度，不需要什么假设条件。但是其弱点是数据采集量大，只能对已有道路构型进行研究，并且对于个别因素的影响情况很难确定。理论分析方法，需要采取一些基本假设，但这种假设会受研究水平的限制，可能不正确，与实际会有偏差。这两种方法对具体环境的局部问题可以较好的解决，但对于高速公路整个系统，各种道路和交通条件组合情况的研究，难以很好的胜任。

随着电子计算机技术的成熟与发展，交通仿真容以上两种方法的优点，正成为广泛使用的研究手段。计算机模拟模型是从现场实测的一些基本数据中理论推导和抽象出来的，可以产生大量的与实测数据相似的仿真数据。而且可以通过虚拟手段建立、研究各种道路构型，对复杂系统的整体研究更加有优势。交通仿真克服了传统方法的局限，为高速公路的研究提供了一种新的高效便利的研究手段。它具有节省费用、安全、快速、研究范围广、可控制、可重复等优点。

交通仿真模型与其他交通分析技术，如需求分析、通行能力分析、交通流模型、排队论理论等结合在一起，可以用来对多种因素相互作用的交通设施或交通系统进行分析和评估。这些交通设施或交通系统可以是单个的信号灯控制或无信号控制的交叉口，也可以是居民区或城市中心区的密集道路网、线控或面控的交通信号系统、某条高速公路或高速公路网、双车道或多车道县（乡）公路系统等等。另外，交通系统仿真还可以用来分析和评价交通集散地，如停车场、中转站、机场等的规划设计及运行状况。

当然，交通系统仿真不仅限于道路运输系统，在其他运输系统中也得到了广泛的应用，如公共交通系统、轨道交通系统、航空运输系统、水运系统、行人交通系统、传送带运输系统等。

## 1. 2 国内外研究现状及发展趋势

### 1. 2. 1 国外研究现状

1951年，由英国交通道路研究实验室承担的交叉口微观仿真是最早的交通仿真研究项目。1953年，洛杉矶加利福尼亚大学开发了交叉口和高速公路的仿真模型是第一个美国交通仿真项目<sup>[1]</sup>。可以说欧洲和美国在这方面发展的最早。Wiheim Leutzbach 和 Rainer Wiedemann<sup>[2]</sup>将交通仿真定义为用数学模型复现交通流时间和空间变化的技术。也就是利用计算机技术，对所研究交通系统的结构、功能、行为以及参与交通控制者一人的思维过程和行为特征，进行比较真实的重现。随着计算机技术的发展，以及人们对交通问

题的深入研究, 仿真技术日益成为研究交通问题的重要手段。许多国家的交通工程师在这方面作了很多的工作。到现在以美国发展得最为成熟。

高速公路仿真模型主要分为微观模型与宏观模型两大类, 其中微观模型包括 INTRAS、FRESIM、CARSIM、WEAVSIM、FREESIM, 宏观模型包括 FREQ、FREFLO、KRONOS、CORQ。

INTRAS (INtegrated TRAffic Simulation)<sup>[3]</sup>, 该模型是美国最为成功的微观交通仿真模型。起先主要应用于高速公路事件研究及交通控制, 到 80 年代初该模型已成为能对城市道路和高速公路进行微观仿真和宏观分析的综合交通仿真系统。当今流行的综合微观交通仿真软件 TSIS 中采用的就是 INTRAS 的改进模型。

FRESIM<sup>[4]</sup>是按结构化设计技术对 INTRAS 模型的改进, 它可以仿真复杂的高速公路几何结构, 比如车道的增加减少、辅助车道、变化坡度、曲线的超高和不同的半径。可以说是一个比较完善的高速公路微观仿真模型。

CARSIM<sup>[5]</sup>, WEAVSIM<sup>[6]</sup>都是基于 INTRAS 模型之上的, 但强调特殊用途。CARSIM 提供额外的模拟功能, 如在跟驰逻辑上, 表现高速公路上车辆停车再启动的过程; 而 WEAVSIM 则专门用来研究交织区的动态交通流。

FREESIM<sup>[2]</sup>是随机性模型。用来模拟跟驰和换车道的一系列算法是建立在对信号标志反应基础上的。

FREQ 是美国加利福尼亚大学自 1968 年开始连续开发的模型。至今已开发到了第十代。用来估算特定高速公路上有限进口控制和一般进口控制。最先是用于高速公路改建评价的, 以后每一代都有新的功能。

FREFLO 用流体理论描述高速公路上的交通流。FREFLO 开始不能很好的模拟拥挤条件下的交通流, 后来通过交通分配平衡模型为它提供流量和路线信息。

KRONOS 用一些简单连续模型表现交通流, 并能够模拟受干扰的交通流, 例如, 换车道、合流、分流、交织、阻塞等车流, 这些现象往往在其他高速公路宏观模型中不能表现。

CORQ (CORridor Queuing) 是一个高速公路仿真和交通分配的宏观模型。主要用途是模拟不同时间的高峰需求, 结合动态交通分配技术估算通信能力等。

国外仿真研究发展较早, 也相对成熟。由于经过长时间的发展, 这些模型可较好的描述相应的车辆行为。这些模型的建模方式和考虑因素值得我们学习和借鉴。但是国外的仿真模型大都根据本国道路、交通状况开发, 而我国的道路和交通状况有自己的特点, 例如国内小客车普及程度低, 道路上货车比例相对较大, 车道宽度与国外不同, 驾驶员的特性不同 (比如反应时间等), 换车道行为有明显区别等。这些不同因素, 使得国外的仿真模型在某些程度上不能很好适应我国的情况。针对我国高速公路特点, 借鉴国外经验改造已有的或开发自己的模型是我们的发展方向。

## 1. 2. 2 国内研究现状

我国高速公路交通和道路状况有自己的特点, 如车道宽度、驾驶员特性 (反应时间), 换车道行为等都有明显区别。由此形成的交通构成、交通流特性、交通组织管理方法都与国外有很大不同, 这些因素使得国外的仿真模型在某些程度上不能很好的适用中国国情。因此国内的交通仿真软件必须在国外软件的基础上, 针对我国高速公路特点, 开发适应中国自己特色的仿真系统。

在我国, 用系统仿真技术进行道路交通的仿真实验开始于 20 世纪 80 年代, 并且主

要集中在高等院校等研究机构。早在 1984 年,北京工业大学就开始了交通仿真的研究工作,为了解直行汽车车队通过信号灯路口的运行状态,用 BASIC 语言编制了一个仿真程序,来求解头车运动方程和跟驰方程;1985 年,采用以 PASCAL 语言编制的程序并基于事件扫描方法对信号灯路口交通特性进行了仿真研究;20 世纪 90 年代初,采用以 C 语言编制的程序对高速公路路段通行能力进行了计算机仿真;1996 年,在 Windows 环境下以面向对象的程序设计语言 Visual C++ 开发了用于高速公路基本路段行车仿真研究的软件 BESS<sup>[8]</sup>,讨论了高速公路基本路段理想条件下的通行能力和大中型车的 SVE 值。从交通流统计分析模型、理论分析模型和仿真模型三个方面的综合分析,得出了理想条件下,我国现阶段高速公路基本路段的通行能力值;近两年来,又开展了高速公路基本路段通行能力和道路交织区交通行为的仿真研究。

同济大学在 20 世纪 90 年代初,建立了优先控制 T 型交叉口车辆运行的仿真模型,并研制了相应的仿真软件,用来分析不同道路和交通条件对优先控制的 T 型交叉口通行能力的影响;近年来,利用微观仿真对高速公路互通式立交的通行能力及延误进行了研究,运用软件工程思想、对象建模技术(OMT)和真实化程序设计的概念,在需求分析的基础上,开发了以高速公路匝道控制为研究对象的微观交通仿真软件 MicroSim<sup>[9]</sup>。MicroSim 建立了车辆生成模型和基于驾驶员心理反应 PIEV 模式的车辆形式模型,评价了影响道路入口匝道范围内交通流运行状况各因素的作用。

东南大学在交通系统仿真研究方面也取得了一系列研究成果,例如 20 世纪 90 年代中后期进行的城市交通网络研究、城市交通实时模糊控制研究,提出了单路口交通实时模糊控制方法;另外,还采用动态微观仿真方法研究了路段通行能力,考虑驾驶员、车辆、道路、环境和交通规则的相互关系及对通行能力的影响,从微观的角度出发建立了仿真模型。

清华大学交通研究所于 20 世纪 90 年代末期,在 Windows 平台以面向对象的设计思路开发了名为 TraSimul 的仿真软件,用以模拟城市平面交叉口的拥挤特性,为缓解城市平交路口的交通拥挤提供了有力的工具。

其他的还有西南交通大学进行了初步的交通系统仿真及在交通控制中的应用研究,利用仿真技术进行了高速公路车头分布间隙分布规律及其应用研究;华南理工大学利用交通仿真分析了信号交叉口的通行能力和服务水平;上海交通大学建立了宏观交通流分配仿真模型,实现了路网中的流量分配;北京理工大学开发了城市交通诱导仿真系统;天津大学利用仿真进行了交通流自组织管理控制研究,以交通流元细胞自动机模拟和仿真结果说明交通流中自组织现象并进行了理论分析与数学描述;中国科技大学进行了基于微观跃动模型的趋势交通仿真研究。吉林大学在交通系统仿真方面也开展了一系列的研究,主要是用 GPSS 仿真语言对交叉口的交通状况进行仿真研究。此外,长安大学、西安交通大学、交通部公路科学研究所等单位也开展了交通仿真方面的研究工作。

交通系统仿真技术在我国的应用只有十几年的历史,还远远没有被广泛接受。并且从已经做过的工作来看,基本上都是探索性的,迄今为止还没有开发出一个被普遍认可的或能用来解决实际问题的系统仿真软件。虽然也有人试图用国外的软件来对我国的交通进行仿真实验,但由于国情的不同,也没能得到满意的结果。

国内仿真模型发展越来越受到重视,虽然还有许多不足,但它们是根据我国的交通特点开发的,在这方面要好于国外模型。我们也可看出,国内仿真模型大部分是对特定交通设施进行描述,许多是单独的模型,能够较好的解决单一的、局部的问题。但是对于复杂、综合的问题,例如高速公路系统的研究缺乏有效的整合模型。

本文通过吸取国内外仿真研究的经验,将已有的单独的仿真模型系统地整合起来,

根据我国道路和交通的特点对整体进行有效性验证和重新标定，改造某些模型不适用方面，这将是一项有意义的工作。

整合模型系统对于研究高速公路上不同道路环境和交通环境组合问题将更加有效。

### 1. 3 本文研究的主要内容

1. 分析研究我国高速公路系统交通流特性，分析基本路段、匝道口、收费站这三个地段车辆运行的特点；
2. 结合国内外高速公路交通流仿真模型的研究成果，分析对比其合理性、适用性，选择建立适合我国高速公路的动态交通流的计算机仿真模型；
3. 设计开发高速公路系统仿真整体框架及各模块内容，编写高速公路动态交通流仿真程序，通过计算机仿真动画演示，直观的、模拟的显示车辆在高速公路基本路段、匝道口、收费站行驶中的一些交通行为；
4. 设计仿真程序应用方案，通过所开发的仿真程序，对高速公路某一部分进行模拟，并分析研究仿真结果。

## 第二章 高速公路交通流特性分析

### 2. 1 高速公路系统交通流特性理论

#### 2. 1. 1 高速公路车辆特征

司机根据自己的技能水平、车辆性能与道路条件, 综合决定自由行驶时的期望车速。具体对于某辆车在道路上的运行状况可分为以下三种情况<sup>[11]</sup>:

1. 匀速行驶: 当前导车车速高于跟踪车车速或前导车与跟踪车车头间距远大于最小车头时距时, 车辆处于匀速行驶状态;
2. 跟踪: 当前后两车车头间距处于最小车头间距附近、跟踪车期望以高于前导车车速行驶而又不能够超车时, 跟踪车处于跟踪状态;
3. 超车: 当跟踪车期望超车而又有足够的超车间距时, 跟踪车进行超车。

#### 2. 1. 2 高速公路交通流运行特征

高速公路及其组成部分是在非间断交通流的形式下运行的, 不仅对交通流没有固定间断, 而且车辆进出高速公路也受匝道位置的限制与管制。

任何已知交通流的运行状态都是由速度、交通量或者流率以及密度这三种主要度量指标来确定的。他们之间的基本关系可以表示为:

$$Q = K \cdot V \quad (2-1)$$

式中,  $Q$ —流量, 辆/小时;

$V$ —速度, 公里/小时;

$K$ —密度, 辆/小时。

从式中可以看出, 流量为零值时会在以下两种截然不同的条件下出现: 一是当道路上没有车辆时, 密度为零, 流量也为零。在这一条件下速度是纯理论的, 是第一个驾驶者可能选择的任何高速度。二是当密度高达所有车辆停驶的程度时(速度为零), 流量也是零。因为没有活动, 车辆不能通过道路上任何一点。在这两个极端之间, 交通流的动态特性才产生最大的影响。当密度由零增加时, 因为道路上行驶的车辆增多了, 所以流率也在增加。此时, 由于车辆之间的干扰, 速度开始下降(由于车辆的相互作用)。在低密度和低流率时, 这种下降实际上可以不计。然而, 当密度持续增加, 达到某一值时, 会使速度急剧下降。当密度增加和速度下降而引起流量减少时, 流率达到最大值。

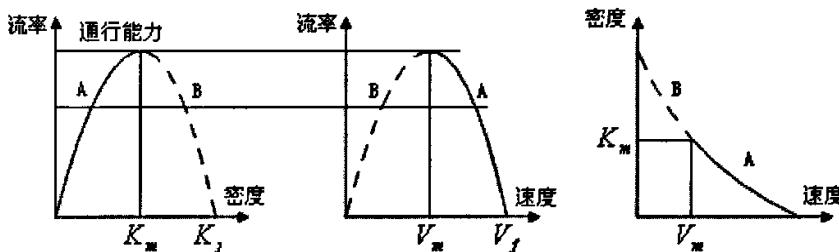


图 2-1 连续流高速公路速度、流率、密度三参数的关系

任何已知交通设施的最大流率就是他的通行能力<sup>[12]</sup>。此时出现的交通密度称为临界密度，这是出现的速度被称为临界速度。当接近通行能力时流量变得更不稳定，因为交通流中有效间隙更少。达到通行能力时，交通流中不再有可利用的间隙，并且车辆进出设施，或在车道内部改变行驶所带来的任何干扰，都会产生难以抑制或消除的障碍。因此，达到或者接近通行能力的运行，很难长时间维持不致形成上游排队，从而强制流或阻塞流变得几乎不可避免。由于这一点原因，大多数设施的设计交通量小于其通行能力。如图 2-1 所示除通行能力外，任何流率能在两种不同的条件下出现：一种是高速度和低密度，另一种是高密度和低速度。曲线的整个高密度、低速度的半边被认为是不稳定的，他代表强制或阻塞流。曲线的低密度、高速度的半边是稳定流范围。

## 2. 1. 3 交通量、密度、速度之间的基本关系

除了  $Q=K*V$ ，还有以下一些关系。

### 1. 速度—密度的关系

关于速度和密度的关系，用公式可表示为

$$V = V_f (1 - K / K_j)^\alpha \quad (2-2)$$

式中， $V_f$  — 当车流密度很小时，车流在自由状态下最大速度；

$K_j$  — 当交通发生阻塞时，车速趋近于 0 时的最大车流密度；

### 2. 流量—密度的关系

将式 (2-2) 代入式 (2-1)，得到

$$Q = V_f (K - K^2 / K_j)^\alpha \quad (2-3)$$

式 (2-3) 为抛物线方程，根据  $V-K$  关系式的不同，可得到不同的表达式。

### 3. 流量—速度的关系

同样通过速度—密度关系，可以求出流量—速度关系为

$$Q = V_f (1 - V / V_f)^\alpha [K_j - (1 - V / V_f)^\alpha] \quad (2-4)$$

由式 (2-2)、(2-3)、(2-4) 关系式可绘制  $V-K$ 、 $Q-V$ 、 $Q-K$  关系曲线图，如图 2-2 所示。

由图 2-2 可知：

1. 当车流密度小于最佳车流密度时，车流处于自由行驶状态，平均车速高，交通量没有达到最大值，密度增大，交通量也增大；
2. 当车流密度接近或等于最佳车流密度时，车流出现车队跟驰现象，车速受限制，各种车辆接近某一车速等速行驶，交通量将要达到最大值；
3. 当车流密度大于最佳车流密度时，车流处于拥挤状态，由于车流密度逐渐增大，车速和交通量同时降低，交通发生阻塞，甚至将发生停车现象。

根据理论推导可得：最佳车流密度 ( $K_m$ ) 为道路完全阻塞最大车流密度 ( $K_j$ ) 的一半值：

$$K_m = K_j / 2 \quad (2-5)$$

道路上交通量达到最大值时行车速度 ( $V_m$ ) 为自由行驶状态的最大车速 ( $V_f$ ) 的一半值：

$$V_m = V_f / 2 \quad (2-6)$$

道路上的最大交通量为：

$$Q_{\max} = V_m * K_m = (V_f * K_f) / 4 \quad (2-7)$$

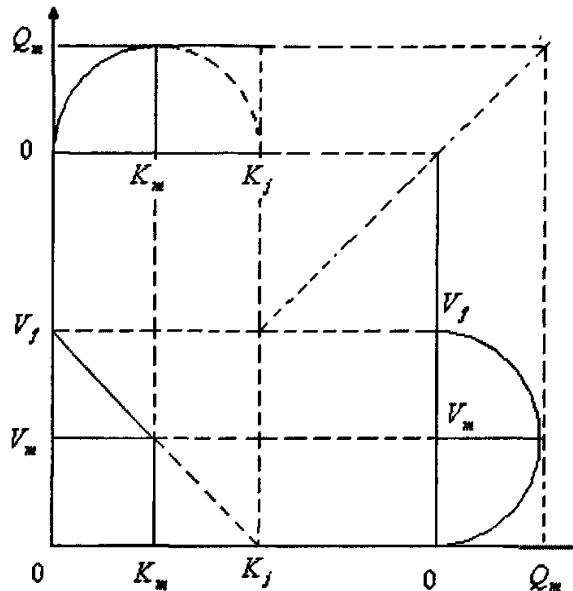


图 2-2 交通量—速度—密度关系图

## 2. 1. 4 影响高速公路车流运行的因素

经过对全国高速公路运行现状调查发现，影响我国高速公路车流运行的主要因素是混合交通的车辆组成情况<sup>[161]</sup>。主要表现在两个方面：一是大、重车比小客车体积大，因而比小客车占用更多的道路空间；二是这类车辆的行驶性能（如加速、减速和保持速度的能力等）要远低于小客车。这些不同行驶性能的车辆会导致在交通流中形成间隙，但又不能立即为超越车辆所利用。特别是对于长距离持续上坡路段，影响有位显著。在这种情况下，货车不得不明显的降低车速，在交通流中出现非常大的间隙，道路通行能力降低。

## 2. 2 高速公路基本路段交通流运行特性

由于基本路段是不受匝道附加合流、分流及交织流影响的路段，所以基本路段上的车辆从纵向来看主要是加速、减速、或匀速行驶；从横向来看主要是不换车道或换车道行为。从车辆之间行驶关系来看，车辆的运行又可分为跟驰、自由行驶、停车、换车道（超车）三种状态。这几种状态之间的关系见图 2-3。

在车流量较小的高速公路基本路段上行驶的车辆速度主要受道路横断面、平曲线、纵断面线性的影响。由于没有匝道影响，因此基本路段中的换车道现象主要发生在快速车辆跟随慢车行驶时，快速车辆为使自己车速不致于下降很多而采取变换车道或者超车情况下。这种换车道行为是在当前车道行驶状态不能满足司机的要求，而且相邻车道行驶条件比当前车道优越情况下发生的，具有换车道需求产生过程，是一种判断型（discretionary）换车道行为。

基本路段上的车辆在几条车道上的分布也不同。这种不同体现在车型、车速、车流密度。

《高速公路交通管理办法》<sup>[13]</sup>中明确规定了各车道的性质：高速公路以沿机动车行驶方向左侧算起，第一条车道为超车道，第二、第三和其他车道为行车道。并对不同车速的车行驶的车道作了相应规定。小型车车速高，常集中在内侧车道，但超车道上不允许长时间占用。大型车车速较低，一般行驶在外侧车道。在坡度较大的上坡路段，还专门为重型车设置爬坡车道。这就造成各车道车型密度不同。同时内侧车道车流速度高速外侧车流。

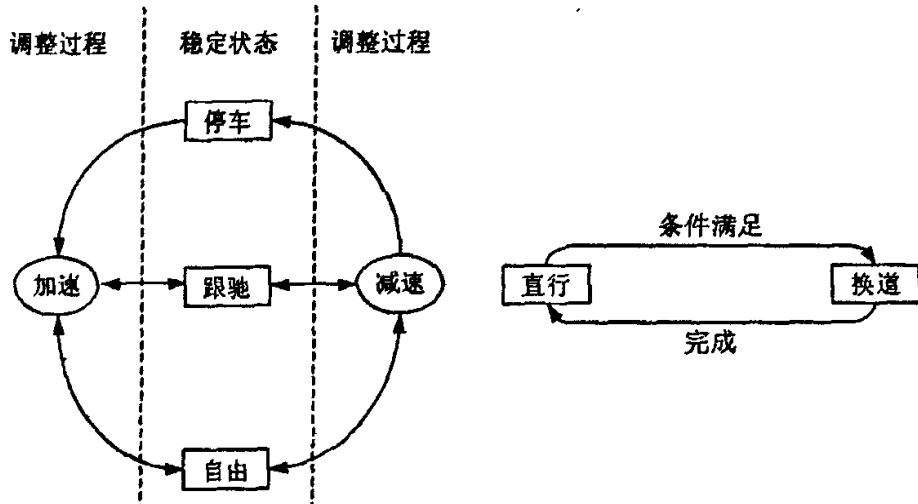


图 2-3 车辆行驶状态

## 2. 3 高速公路匝道口交通流运行特性

### 2. 3. 1 入口匝道车辆运行特性

入口匝道的合流车辆要进入高速公路，先要进入加速车道行驶，同时寻找高速公路最外侧车道中车流可插入间隙，并调整加速度大小。当出现可插入间隙合流车实施换车道操作，进入高速公路最外侧车道。合流车辆与高速公路主线车辆在匝道连接点附近争夺交通需求空间，造成这个区域交通流特征非常复杂。

由于高速公路运行规则的存在，合流车辆与高速公路主线上的车辆在争夺行驶空间上不平等。这也就是说，在出现争夺行驶空间情况下，主线车辆优先行驶，汇入车流只有在高速公路主线车流中出现足够大的空隙时，才能进入；否则，加速车道上的车辆只有等待下一个空隙，重复同样的判断，一直到出现可接受插入间隙，完成汇入行为。若主线车流量太大，合流车辆在变速车道上始终无法找到合适的间隙，合流车辆将在加速车道末端减速并停车，直到主线上出现合适间隙才重新启动实现合流。

加速车道长短，匝道入口类型、入口角度等因素都会对汇入车辆的行为产生很大的影响。例如，加速车道较长，驾驶员会有更多的时间来寻找可插入间隙，在未汇入前，驾驶员改变速度的幅度较小，舒适程度和安全性提高，降低合流车辆的延误。

由于主线车流与匝道内车流在这个区域合流，必然会造成改区域车流量增加，当车流量很大时，会产生拥挤甚至阻塞，因此合流区可能会是高速公路的瓶颈区域。合流车辆直接汇入最外侧车道，对最外侧车道车流影响最大，但这种影响会涉及到整个路段所有车道的车流分布。其特征表现为靠近外侧车道上的车辆为避免与合流车辆产生空间冲突，会尽量向内侧车道换位，同时造成与内侧车流争夺空间。这将使内侧车道的车流量增加，导致车速降低，

内侧车辆驾驶的舒适程度和安全性也会降低。改善合流区的车流情况可以提高高速公路主线的通行能力。

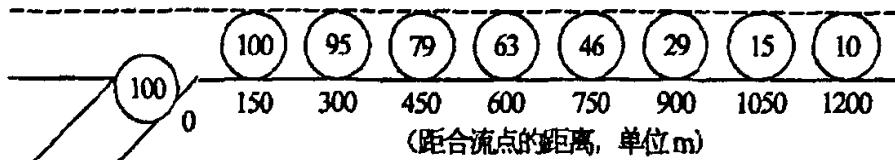


图 2-4 入口匝道车辆从不同位置进入外侧车道的百分比<sup>[14]</sup>

匝道控制是高速公路上常用的控制方式之一，入口匝道控制的目的是通过把高速公路上的延误因素转移到入口匝道，从而在高速公路上维持一个既不间断也不拥挤的交通流，也就是把超量的车辆转移到其他可替代道路上，或者转移到需求较低的其他时间，或者采用其他运输方式。

## 2. 3. 2 出口匝道车辆运行特性

从减速车道道口上游一段距离起，分流车辆就开始向外侧车道换车道，为进入减速车道做准备。当行驶到减速车道起点附件时，开始寻找可换入间隙，并调整加速度，当出现合适间隙后，换入减速车道，并跟随减速车道上的其他车辆从出口匝道驶出高速公路。分流车为分流准备及分流时左的换车道行为对外侧车道的车流影响最大，但同时波及到其他车道。所以在分流区的车流也与基本路段不同。

由于驾驶员特性不同，从上游来的分流车辆在到达减速车道起点后可能会有两种情况，1) 分流车已经在最外侧车道；2) 分流车还没有换到最外侧车道。如果车流量不是非常大，大部分车辆会出现第一种情况。在第一种情况下，一部分驾驶员从减速车道起点处就开始换入；另一部分则并不急于减速换入，而是继续在最外侧车道上行驶一段时间后，才开始换入减速车道。据观测资料处理结果表明，大约 90% 的车辆在减速车道开始 2/3 的位置时已经完成了车道变换操作，同时也有一小部分车辆在出口附近才进行车道变换。第二种情况往往因为分流交通量太大，部分分流车在到达减速车道时未来得及换到最外侧。这时分流车为在到分流点之前驶入减速车道必然要强行挤入外侧车道和减速车道。如果在到达分流点附近还没有换到减速车道，则只能停车等待。图 2-5 是驶出匝道车辆在外侧车道距离出口匝道的百分比。可以看出，95% 的驶出车在距出口匝道 300 米的上游路段已经进入最外侧车道，完成换车道的准备工作。

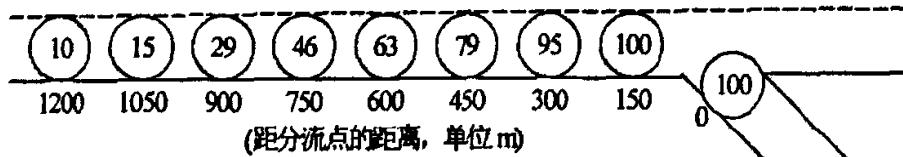


图 2-5 驶出匝道车辆不同距离在外侧车道内百分比<sup>[14]</sup>

出口匝道发生拥挤实际上并不在于减速车辆本身，而在于与匝道相衔接的道路交通状况。若匝道下游交通顺畅，则分流车辆可以顺利实施换车道和减速行为，完成分流过程。反之，分流出来的车辆不能驶入匝道，就会滞留在减速车道上，影响分流车辆正常运行，严重时导致交通堵塞。

### 2. 3. 3 交织区内交织车辆与非交织车辆运行特性

交织区内交织车辆必须在一定的交织长度内完成换车道行为，它与匝道的车辆汇入特性有类似之处，即使在不适宜换车道的情况下也会强制汇入，但比之更为复杂，因为交织车辆的换车道行为是两条车道车辆交互进行。

从入口匝道进入的车辆在汇入主线时不但要考虑主线外侧车道车流的可插间隙，还要考虑主线分流车的影响，而主线分流车同样要考虑辅助车道上合流车的影响，这一点与合流、分流匝道不同。如果合流车与分流车同时争夺空间，则主线分流车要有优先权，合流车要等待分流车让出相应位置之后再进行合流。

交织区内交织车辆的车速受交织区长度影响很大。美国通行能力手册认为，交织区长度应该在 750m 以下，否则进出口之间的路段不再视为交织区，因为此时进出口之间的车辆运行中换车道的紧迫性不明显，交通运行特征是合流点和分流点特征。交织区长度过短，所有交织车需要在很短时间内完成换车道，分流车流和汇入车流互相影响，严重的紊流使交织车辆车速下降，整个路段通行能力降低。

式 2-8 反映了交织或非交织车辆的平均速度与交织区长度成正比<sup>[16]</sup>。

$$S_w \text{ 或 } S_{nw} = 24.1 + \frac{80.47}{1 + a(0.3048)^d (1 + V_R)^b (V/N)^c / L^d} \quad (2-8)$$

式中， $a, b, c, d$ —常数；

$S_w$ —交织车辆的平均行驶速度，km/h；

$S_{nw}$ —非交织车辆的平均行驶速度，km/h；

$V_R$ —交通量比值；

$V$ —交织区的总流率，辆/h；

$N$ —交织区内车道总数；

$L$ —交织区长度，km；

交织区宽度对交织运行也有影响，交织车比非交织车占用更多的有效车行道空间，它取决于使用交织段的交通量和必须的车道变换次数。当交织车辆为完成均衡运行所必须使用的最大车道数小于可能的最大车道数时，交织车要求所占用的车道数得到满足，此时的交织运行状态称为非约束型运行；反之，要求占用的车道数受到限制，引起非交织车辆的速度平均值高于交织车速度平均值，成为约束型运行。

交织区内的非交织车辆与基本路段上的车辆相比较，不可避免的要受交织车辆的干扰，因此进行换车道行为的频率也很高。这是基于司机对交织车道运行条件的恶化做出的必然选择。因此，宏观上交织区不仅交织车道交通紊乱，非交织车辆运行同样产生波动。只有交织车辆与非交织车辆的换车道行为综合在一起，才能形成交织区宏观上独特的流量、密度、速度分布特性。

交织车辆集中在外侧车道和辅助车道上，因此外侧车流受影响最大。外侧非交织车辆为避免与交织车辆争夺空间，倾向于向内侧换车道，内侧车流也会受到影响。内侧车往往不再换到外侧，同时受到外侧换入车辆的影响车速也会下降。

### 2. 4 高速公路收费站交通流运行特性

收费站是指为收取车辆的通行费用而设立的交通设施，通常包括：收费门（包括：收费

岛、收费亭、收费车道、收费机械)、收费广场、收费所。收费站的通行能力是指在单位时间内在一定服务水平下能够通过收费站最大车辆数。其中收费车道的通行能力决定收费站的通行能力。

车流在公路收费站的运行有其独特之处。公路收费站交通流特性分析是收费站延误分析和通行能力分析的基础,也是对交通流进行微观模拟和描述的基础。一般情况下,当车辆进入和离开收费站时,车辆从主线或匝道接近收费站,进入收费广场时车辆减速,寻找排队长

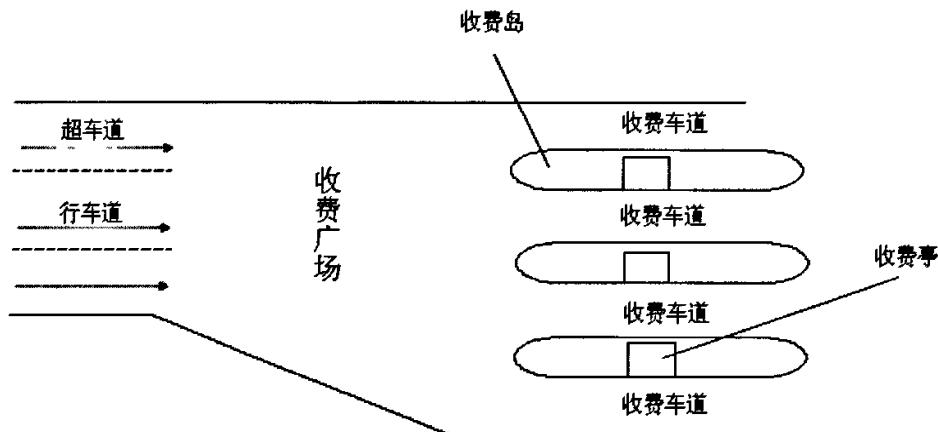


图 2-6 高速公路收费站示意图

度较短或没有排队的收费车道交款或领票,如果所选择的收费车道上有排队等候的车辆,那么就在队尾排队等候服务,接受完服务后,加速离开收费广场进入主线或匝道。如果所选择的收费车道没有排队等候的车辆,那么就直接进入收费车道接受服务,然后加速离开收费广场进入主线或匝道。总体来说,可以将车辆通过收费站的过程描述为:减速进入收费广场—排队等候(如果形成排队的话)—接受服务(交款或领票)—加速离开收费广场。

一般情况下减速进入收费广场和加速离开收费广场仅与车辆的加减速性能和司机的驾驶行为有关,与收费站提供的服务关系不大。排队等候过程和接受服务过程与收费站提供的服务密切相关。它们是进行延误分析和通行能力分析的关键。排队等候的过程相对比较固定,经典排队理论模型将在第三章中详细地描述,这里不再赘述。这里详细分析了接受服务的过程。按照服务时间完成任务的不同,可将接受服务的时间划分成两个部分,纯粹服务时间和离去时间。纯粹服务时间是指从车辆进入收费地点停下,到车辆接受服务(交款或领票)完成后启动车辆准备离开收费地点之间的时间间隔,简称服务时间。车辆离开服务地点到后车进入收费地点停下之间的时间间隔为离去时间。另外,无论收费系统中是否存在排队,任一车辆在接受服务后的离开过程中,都还会占用收费地点一定的时间和空间,因此,该车辆在通过收费站的过程中仍然包含有离去时间这一部分。

收费站的服务水平是衡量收费站内部交通流提供给司机与乘客服务质量的一种标准。一般评价收费站服务水平的指标有收费时间,排队长度,车辆在收费站的延误时间。

收费时间的长短与收费制式、收费设备以及收费人员的素质有关。对于特定的收费制式下的收费站,其收费时间变化不大,不能反映出收费站内交通流运行状态的变化,收费时间的长短可用于不同类型收费站服务质量的比较,而对于特定收费站内的交通条件质量的评价,收费时间则不是一个合适的参数。

车辆在收费站延误时间的长短描述了由于收费站的存在造成车辆在经过产生延误,延误时间的长短直接反映车辆在经过收费站时其交通条件质量的好坏。从这方面来说,延误时间的长短能够较好的评价收费站内交通条件质量。但是,延误数据的获得相对比较困难,使延

误数据的精确度相对较低。

收费站的平均排队长度是指收费站内各收费车道等待服务的平均车辆数。排队车辆数的多少能够被司机和乘客直观感受到，直接影响司机和乘客对交通条件的感受，排队车辆多司机和乘客认为将要等待的时间长，排队车辆少司机和乘客认为将要等待的时间短。通过人工计数的方法，可简单、准确的获取收费站排队长度的实测数据。

# 第三章 高速公路交通流仿真模型分析

## 3. 1 交通仿真概述

### 3. 1. 1 交通仿真的定义

仿真是指对真实事物的模仿。“仿真”一词另外一个常见的提法是“模拟”。根据“国际标准化组织（ISO）标准”中《数据处理词汇》部分名词解释，“模拟（Simulation）”与“仿真（Emulation）”两词的含义分别为：“模拟”即选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征，用另一系统来表示它们的过程；“仿真”即用另一数据处理系统，主要是用硬件来全部或部分地模拟某一数据处理系统，以致于模仿的系统能像被模仿的系统一样接受同样的数据，执行同样的程序，获得同样的结果。

仿真界专家和学者对仿真下过不少定义，其中比较通俗的描述性定义是：仿真是通过系统模型的实验去研究一个存在的或设计中的系统<sup>[1]</sup>。不管是物理仿真还是利用计算机仿真，都不是用数学解析方法或者物理实验方法，而是利用模拟模型产生一个认为的系统的运行过程，虚拟的表现真实系统的结构和行为。对于简单的系统，我们可以通过微积分、概率论、代数方程等解析方法求解；对于复杂的系统，解析方程难以建立或未知量过于复杂难以求解，此时通常借助仿真求解。

交通系统仿真是指用系统仿真技术来研究交通行为，它是一门对交通运动随时间和空间的变化进行跟踪扫描的技术，是利用计算机对所研究交通系统的结构、功能、行为以及参与交通控制者——人的思维过程和行为特征进行比较真实的重现<sup>[2]</sup>。从交通系统仿真所采用的技术手段以及所具有的本质特征来看，交通系统仿真是一门在数字计算机上进行交通实验的技术，它含有随机特性，可以是微观的，也可以是宏观的，并且涉及到描述交通运输系统在一定期间实时运动的数学模型。通过对交通系统的仿真研究，可以得到交通流状态变量随时间与空间的变化、分布规律及其与交通控制变量的关系。因此，交通系统仿真在道路运输系统及其各组成部分的分析和评价中发挥着重要作用。

### 3. 1. 2 交通仿真的分类

#### 1. 按模型描述细节程度分类

根据模型描述细节程度的不同，交通仿真可以分为微观仿真（Microscopic Simulation）、中观仿真(Mecroscopic Simulation)和宏观仿真(Macroscopic Simulation)<sup>[13]</sup>。微观模型对交通系统的要素及行为的细节描述程度最高，并试图通过真实反映系统中的所有个体的特性来反映系统的总体特征；宏观模型对交通系统的要素及行为的细节描述处于一个较低的程度，适用于描述系统的总体特征；中观模型对交通系统的要素及细节的描述程度位于微观模型和宏观模型之间。

微观模型、中观模型与宏观模型的主要区别是从不同的角度和方法来描述交通流：

微观交通仿真把每辆车作为一个研究对象，对所有个体车辆都进行标识和定位。在每一扫描时段，车辆的速度、加速度及其车辆特性被更新。微观交通仿真能模拟出短时间内交通流的波动情况。跟驰模型、超车模型及变换车道模型是微观仿真的基本模型。一般来讲，微

观交通仿真对计算机资源要求高,它的仿真速度慢,用于研究交通流与局部的道路设施的相互影响(如车道划分、道路宽度、弯道、坡度及公交站的设置等),也用于交通控制仿真(如交通信号灯控制、让路停车等)。微观仿真模型的重要参数是每辆车的速度和位置。微观仿真在仿真方法上与宏观仿真完全不同,它要对所有个体特性行为及具体过程进行描述。微观仿真对交通系统的要素及行为的细节描述程度最高。微观交通仿真模型对交通流的描述是以单个车辆为基本单元的,车辆在道路上的跟驰、超车及车道变换等微观行为都能得到较真实的反映。微观仿真车辆进入路网的时间、车型、车速的设定及路口的转向都是随机确定的。

宏观模型着重从全局角度来研究系统特征。宏观仿真模型中的交通流被视为一个可压缩的媒体或流体,交通流的运动按照流体机制来处理。宏观仿真通过流量—密度关系来控制交通流的运行,模型中不追踪单个车辆的移动。宏观交通仿真对计算机资源要求较低,它的仿真速度很快,用于研究基础设施的新建、扩建及宏观管理措施等。根据目前计算机硬件的发展水平,可以在大规模的路网范围内进行交通宏观仿真。宏观仿真不对某具体车辆的运动过程进行描述,即不考虑个别车辆的运动,而是从统计意义上成批地考虑车辆地运动。同微观仿真相比,其精度低,应用范围也小。宏观交通仿真模型对交通系统的要素及行为的细节描述程度较低。例如,交通流可以通过流量、密度、速度关系等一些集聚性的宏观模型来描述,而像车辆的车道变化之类的细节行为可能根本就不予以描述。宏观仿真模型适用于描述系统的总体特性,并试图通过真实反映系统中的所有个体特性来反映系统的总体特性。宏观仿真模型的重要参数是速度、密度和流量。

中观模型在宏观交通网络的基础上,将个体车辆放入宏观交通流中进行分析,根据模拟的需要,对特定车辆的速度、位置及其他属性进行标识,或对个体车辆分组,再对每组车辆的速度、位置及其他属性进行标识。这一仿真系统可以用来拟定、评价在较大范围内进行交通控制和干预的措施和方法,从而对交通流进行最优控制。根据目前计算机硬件的发展水平,可以在较大规模的路网范围内进行交通中观仿真,如ITS中面向诱导的交通仿真。中观交通仿真模型对交通系统的要素及行为的细节描述程度较高。其对交通流的描述往往以若干辆车构成的队列为单元,描述队列在路段和节点的流入流出行为,对车辆的车道变换之类的行为也可用简单的方式近似描述。不过,与微观模型相比,中观模型只能部分刻画“车辆—驾驶员元素”的行为。

三种模型各有利弊,有各自不同的应用范围。总的来说,宏观模型的微分关系式可以解释一些交通特性,如不同的组织结构引起的交通流动态波一样的紊乱传播,但其数学关系及其复杂的非线性微积分方程难以应用,另外能否突破被研究对象的局限性,全面深刻的揭示同样复杂的交通流无从验证。而中观模型只能部分刻画“车辆—驾驶员元素”的行为。微观模型可以突破上述缺陷,实践证明,当我们没有真正认识到交通流的复杂逻辑关系,或是逻辑关系太过复杂以至有太多的参数无法标定时,微观仿真结果会比宏观仿真结果准确的多。

由于上述微观模型相对于宏观模型和中观模型的优势,近年来的交通仿真趋势越来越倾向于微观模型。

## 2. 按扫描方式分类

根据扫描方式的不同,交通仿真可以分为时间推进方式和事件推进方式。

仿真技术的关键在于仿真模型的推进方式,该推进方式也称为扫描方式,它是系统状态变量更新的基本方式。为保证系统仿真持续进行,需要有一个机构把仿真时间从一个时间值拨动到下一个时间值。通常把仿真模型给出仿真时间当前值的变量叫做仿真时钟,它起着控制整个仿真时间进程的作用。仿真时钟的推进有两种主要方法,即时间推进方式和事件推进方式。

时间推进方式即是以等长的时段为时间扫描步长,每一步长对系统更新一次,不断推进车辆单元的运行以实现动态的交通流。时间扫描法是微观交通仿真的基本方法。

采用事件步长法构造仿真模型时,以预定的事件出现作为确定仿真步长的依据,事件不出现,系统不更新。更新仿真程序的事件,必须是对仿真具有重要意义的事件。

由以上分析可以看出,事件扫描法只反映具有重要意义的事件,因此具有一定的局限性,不适宜于需要更真实的反映车辆连续动态特性的情况;而时间扫描法不存在这样的缺陷,可以描述每一步长所有车辆的动态特性,能更真实的反应道路的交通情况。

## 3. 2 道路设施模型

在交通系统仿真的诸多模型中,道路设施模型是最重要的静态模型。所谓静态模型是指在一次仿真运行开始后,对象参数不再发生变化。道路设施模型主要用来描述道路的几何特征、车道划分、隔离带以及路肩的宽度、路面类型、固定交通标志的位置等。同时,对于微观交通仿真,道路模型不仅仅是简单的几何图形的记录和表现,更重要的还应起到交通仿真载体的作用,通过有效的数据组织,道路模型必须主动和高效地体现其对动态实体—车辆运行地约束作用,提高仿真运行效率。在辅助计算机程序的帮助下,道路设施模型的建立十分简单、直观、灵活,加之其与车辆模型是分离的,因而为重复仿真和对比仿真提供了很大的灵活性。

### 3. 2. 1 道路设施模型的建立

道路设施模型的建立应紧密围绕整个仿真问题和具体的仿真方法进行。道路设施的几何参数通常来自道路平面、横断面、纵断面设计,如AutoCAD图形文件;道路设施对车辆的约束可根据交通组织设计建立模型。

为了真实地描述实际的道路条件,在道路设施模型中应包括尽可能多且尽可能详细的参数。然而,一些道路设施参数的输入不可避免地要采用人工方式,而为了方便仿真程序使用者,又希望输入参数尽可能少而简,二者相互矛盾。在确定道路设施参数的数量和数据格式时,应正确处理好这一矛盾。对于需要人工输入的参数,应当遵循少而简的原则。所谓少,指的是人工输入的数据量应尽可能少,凡是能依靠计算机程序产生的数据一律不作为输入数据对待,这将为道路几何设计的更改提供方便,这一点在以方案比选为目的的仿真实验中是非常重要的。所谓简,指的是人工输入的数据格式应尽可能简单,以便于非程序编制者使用。为此,可以采用以下方法:

#### 1. 简化为二维问题

道路设施的输入可以采用道路俯视图按平面问题来对待。这样对于道路宽度、车道宽度、隔离带、平曲线等参数不会产生误差;对于竖曲线则可以通过输入起始点的位置,而将纵坡坡度作为辅助参数来解决;对于交通标志则只需要输入其位置,而将标志类型作为辅助参数;道路超高通常不予考虑。

#### 2. 采用地理空间坐标

建立相对坐标系。通常可采用地理空间坐标平面投影来描述道路设施模型,它比绝对坐标使数据输入更加简单,也可为今后装备有全球定位系统(GPS)的车辆运行验证坐标系及坐标变换提供方便。

#### 3. 采用成熟图像信息平台建立道路设施模型

由于交通仿真对环境的要求比较高,应选用成熟的图形信息平台实现道路设施模型。例如,采用成熟的地理信息系统(GIS)平台ArcGIS。

### 3. 2. 2 道路设施计算机图形模型

要采用图形动画演示仿真运算时, 要求道路设施在计算机屏幕上显示出来, 因而就需要建立道路图形模型。

早期由于操作系统和计算机硬件的限制, 广泛使用的微型计算机多采用 VGA 图形适配器, 当设置图形模式为 VGA 下的  $640 \times 480 \times 16$  显示方式时, 水平像素为 640dpi, 垂直像素为 480dpi。像素系视频监视器上最小的可寻点, 像素坐标从 0 开始计数。如设置 640 个水平像素, 则 X 轴坐标计数为 0~639, 并且规定屏幕左上角为坐标原点, 其坐标值为 (0, 0)。

在屏幕上用二维图形描述道路设施, 通常以最基本的图形像素为基础, 通过确定比例尺来实现。例如, 假设纵向 Y 轴方向一个像素代表 0.2m, 横向 X 轴方向一个像素代表 0.5m, 则在屏幕上只能显示长度为 320m 的路段。在早期的 PC 机上, 为了延长屏幕显示的路段长度, 采用如下两种办法:

#### 1. 改变比例尺

仍以  $640 \times 480 \times 16$  显示方式为例, 当 X 方向的比例尺设置为一个像素代表 2m 时, 则屏幕上可以显示的道路长度增至 1280m。然而, 比例尺的选取是有限度的, 交通系统仿真通常不仅要求屏幕上显示道路设施这一静态对象, 更主要的是还要显示车辆运行的动态过程。根据我国的交通组成现状, 一般将机动车划分为大、中、小三种车型, 各自的平均长度分别为 18m、12m 和 5m。因此, 建议 X 轴比例尺的最小极限取为一个像素代表 2.5m, 然后将上述三个平均长度近似地取为 17.5m、12.5m 和 5m。于是, 三种车型地长度可以分别由 7 个、5 个、2 个像素描述。在这种情况下, 屏幕可显示道路长度的极限能力为 1440m。

#### 2. 分段显示

由于屏幕显示的道路长度是有限的, 当被仿真的路段较长时, 为了延长屏幕上的道路长度, 可以采用分段显示的方式, 即将一条道路分为若干首尾相连的小路段, 由上至下, 同时显示在屏幕上, 当一辆车从上一路段走完时会继续行进在下一路段上。这样虽然与实际的视觉效果相比显得繁琐, 但它会给人一种很直观的交通流疏密程度的表示, 很具全面性。

近年来, 由于计算机技术的迅速发展, 高分辨率的显示适配器和监视器已不再是图形工作站的专用设备, 具有 3D 加速、64MB 内存、高速数据总线的显示卡已进入 PC 机中。特别是窗口化计算机操作系统, 对多显示适配器支持, 已为大范围高分辨地实施图形化交通仿真创造了可能性。良好地仿真系统借助 GUI 环境可完整实现道路模型矢量化描述, 进行缩放移动等操作。

### 3. 3 车辆生成模型

交通生成模型是交通系统仿真的最基本模型, 主要解决交通流的输入问题。在现实的交通流中, 车辆的到达是随机的、离散的, 对于这样一个系统进行仿真研究, 首先要解决如何得到符合一定概率分布的随机变量, 而随机变量的产生通常依赖于  $[0, 1]$  区间上均匀分布的随机数。

#### 3. 3. 1 随机数的产生

通过计算机程序来产生给定范围 (通常为 0~1) 的均匀分布随机数列。但是, 在计算机

上用一程序产生永不重复的随机数序列是不可能的。这是因为，用几个数字所表示的一个数列总是有限的，总会出现周期性，即从某个数值开始便重复前面的数列。然而，只要精心选择常数，就可以在出现重复之间得到一个很长的随机数列，这个随机数序列在实际应用中可被认为是随机数。由于计算机程序产生的数列会出现重复，故通常称其为伪随机数。计算机仿真通常产生具有伪随机性质的均匀分布的随机数。利用数字机本身的数字计算功能来产生伪随机数的方法既不需要占用很多内存，又能重复产生，它是目前较为广泛采用的方法。能重复产生出完整一致的随机数列至少可以带来两个好处，首先，能使计算机程序的调试更加方便；其次，在不同的仿真运行中重复使用相同的随机数列，可以比较仿真输出的精度。

当前应用的大多数随机数发生器都是各种线性同余发生器，它是 1951 年由 Lehmer 提出，根据下面的递推公式产生 0 到  $m-1$  之间的整数序列  $x_1, x_2, \dots$ 。

$$x_{i+1} = (ax_i + c)(\bmod m) \quad (3-1)$$

即：

$$x_{i+1} = (ax_i + c) - \text{int}\left(\frac{ax_i + c}{m}\right) \times m \quad (3-2)$$

其中  $\text{int}$  表示取整，初始值  $x_0$  成为种子， $a$  为常数，乘数  $c$  为增量， $m$  为模，对  $a, c, m$  及  $x_0$  的选取强烈影响随机数的统计性质和周期长度。

当  $c=0$  时，称为乘同余法，今天所用的大多数线性同余发生器都采用乘同余法。

此时，式 3-2 变为：

$$x_{i+1} = ax_i - \text{int}\left(\frac{ax_i}{m}\right) \times m \quad (3-3)$$

对二进制计算机，可以按照以下规则选择  $a$  和  $m$ ：

1. 取  $m=2^j$ ,  $j$  是某个整数，一般  $m$  选择在机器所能表示的数的范围内；同时，还要考虑用式 3-1 计算得到的伪随机序列的周期为  $m/4$ ，它应大于试验的持续期。

2.  $a$  一般取与  $a \approx 2^{p^2}$  最接近而又满足  $a = 8K \pm 3$  的那个数，其中  $K$  为任意整数， $p$  为机器字长度。

例如，希望产生一个 8000 个数的序列（最小单位为 1）。根据第一条原则， $m$  应该选择接近 32000，现取  $m=2^{15}=32768$ ，则机器字长至少应为 15 位。再根据第二条  $a \approx 2^{15/2}=181$ ，而与此数最接近且满足  $8K \pm 3$  的  $K$  值为 23，故  $a$  取 181。

递推公式计算出来的伪随机数基本上符合均匀分布的统计特性，概率密度函数为：

$$\text{当 } 0 \leq x \leq m \text{ 时, } f(x) = 1/m$$

$$\text{当 } x < 0 \text{ 或 } x > m \text{ 时, } f(x) = 0 \quad (3-4)$$

均值为：

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \int_0^m x \frac{1}{m} dx = \frac{m}{2} \quad (3-5)$$

方差为：

$$\delta_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f(x)dx = \frac{m^2}{12} \quad (3-6)$$

为了得到 0-1 之间的随机数，用  $x_i/m$  ( $i=0,1,\dots$ ) 进行归一化处理。

### 3. 3. 2 车辆到达分布

车辆的到达在某种程度上具有随机性，在一定的时间间隔到达的车辆，或在一定的距离内分布的车辆数是随机变数，所得的数列可以用离散型分布描述。常用的离散型分布有以下几种：

#### 1. 泊松 (Poisson) 分布

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}, \quad x=0, 1, 2, \dots \quad (3-7)$$

式中：  
 $P(x)$  — 在计数周期  $t$  内到达  $x$  辆车的概率；

$\lambda$  — 单位时间的平均到达率，辆/s；

$t$  — 每个计数周期的持续时间，s；

$e$  — 自然对数的底，取值为 2.71828。

泊松分布应用于车流密度不大，车辆间相互影响微弱，其他外界干扰因素基本不存在，即车流是随机的，此时应用泊松分布能较好地拟合观测数据。

#### 2. 二项分布

$$P(k) = C_n^k \left(\frac{\lambda t}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^{n-k}, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (3-8)$$

式中：  
 $P(k)$  — 在计数周期  $t$  内到达  $k$  辆车的概率；

$\lambda$  — 单位时间的平均到达率，辆/s；

$t$  — 每个计数周期的持续时间，s；

$n$  — 正整数；

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

车流比较拥挤、自由行驶机会不多的车流用二项分布拟合较好。

#### 3. 负二项分布

$$P(k) = C_{k+\beta-1}^{\beta-1} p^\beta (1-p)^k, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (3-9)$$

式中  $p$ 、 $\beta$  为负二项分布参数。 $0 < p < 1$ ， $\beta$  为正整数，其余符号意义同前。

适用条件：当到达的车流波动性很大或以一定的计算间隔观测到达的车辆数其间隔长度一直延续到高峰期间与非高峰期间两个时段时，所得数据可能有较大的方差。

### 3. 3. 3 车头时距分布

为了描述前后车辆到达之间的车头时距分布，常用下列连续型分布函数。

#### 1. 负指数 (negative exponential) 分布

若车辆到达符合泊松分布，则车头时距就是负指数分布。由式 3-7 可知，在计数周期  $t$  内无车到达 ( $x=0$ ) 的概率为： $P(0) = e^{-\lambda t}$ 。这说明，在具体的时间间隔  $t$  内，如无车辆到达，则上一次车到达和下一次车到达之间，车头时距至少有  $t$  秒，换句话说， $P(0)$  也是车头时距等于或大于  $t$  秒的概率。

于是：

$$P(h \geq t) = e^{-\lambda t} \quad (3-10)$$

则车头时距小于  $t$  的概率为：

$$P(h < t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3-11)$$

负指数分布适用于车辆到达是随机的、有充分超车机会的单列车流和密度不大的多列车流情况。通常认为当每小时每车道的不间断车流量等于或小于 500 辆时，用负指数分布描述车头时距是符合实际的<sup>[16]</sup>。

## 2. 位移负指数 (shifted-exponential) 分布

当负指数分布用于单车道交通流的车头时距分布时，理论上会得出大量的 0~1s 的车头时距，但在实际上这种情况不可能出现。因为车辆的车头至车头的间距至少为一个车长加上前车尾部至后车头部的一段距离。为了改正这种不合理，可将负指数分布曲线从原来 0 沿  $t$  轴向右移一个最小间隔长度  $\tau$  (根据调查数据确定，一般在 1.0~1.5s 之间)，得到移位负指数分布曲线，它能更好地拟合观测数据。

分布函数为：

$$P(h \geq t) = e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \geq \tau \quad (3-12)$$

$$P(h < t) = 1 - e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \geq \tau \quad (3-13)$$

位移负指数分布适用于描述不能超车的单列车流的车头时距分布和车流量低的车流的车头时距分布。

## 3. 爱尔朗 (Erlang) 分布

爱尔朗分布是较为通用的车头时距、速度等交通特征的分布模型。根据分布函数中参数 “ $l$ ” 的改变而有不同的分布函数。

累积的爱尔朗分布可写成：

$$P(h \geq t) = \sum_{i=0}^{l-1} (\lambda t)^i \frac{e^{-\lambda t}}{i!} \quad (3-14)$$

当  $l=1$  时，式 3-14 简化为负指数分布；当  $l=\infty$  时，将产生均一的车头时距。这说明，爱尔朗分布中，参数  $l$  的选择反映畅行车流和拥挤车流之间的各种车流条件。 $l$  越大，说明车流越拥挤，驾驶员自由行车越困难。因此， $l$  值是非随机性程度的粗略表示，非随机性程度随着  $l$  值的增加而增加。

## 3. 3. 4 车型分布

根据收费标准及车辆的物理特性，并参考《公路工程技术标准》，将车型划分为小型车、中型车和大型车三类<sup>[17]</sup>。

1. 小型车：指一般车长小于 5m，车辆满载总重在 4 吨以下的汽车，包括小客车（轿车）、轻型载重汽车、轻型越野汽车及小型旅行车等。

2. 中型车：指车长为 5~8m，车辆满载总重不超过 10 吨的汽车，一般载重汽车、越野汽车等划为中型车。

3. 大型车：车长通常大于 8m，满载总重在 10 吨以上，如重型载重汽车、大客车和半挂车等。

不同高速公路上的车型分布相差较多，需要对各种不同路段进行实测分析后才能确定。如在参考文献[37]中沪宁高速公路的无锡东收费站车型比例小车 64%、中车 23%、大车 13%；而在参考文献[31]中，认为车型分布服从平均分布。

车辆折算系数见表 3-1。

表 3-1 车辆折算系数表

车型	小型车	中型车	大型车
折算系数	1.0	1.3	2.0

### 3. 3. 5 驾驶员特性分布

人、车辆和道路组成了道路交通系统。人是系统的主要部分，而驾驶员的作用尤为重要，驾驶员的行为对整个系统的运行有着很大的影响，其行为特征的积累表现为系统运行的特性。驾驶员的交通特性影响其驾驶的能力和倾向，从而对整个交通系统的特性和行为产生影响。

在驾驶模型中所考虑的驾驶员的交通特性包括反应时间、驾驶倾向性两项指标。

反应是回答某种刺激所产生的动作。反应时间是指驾驶员从感知信息，经过思考判断到作出相应的操作响应这一过程的时间<sup>[18]</sup>。

反应时间的长短与以下因素有关：

1. 刺激的种类和强弱；
2. 驾驶员的个人特性—反应能力；
3. 驾驶员的注意程度；
4. 客观情况的复杂程度

通常认为驾驶员反应时间与性别和年龄的关系为：男驾驶员反应时间较女驾驶员短，老年驾驶员反应时间较青年和中年驾驶员长。

反应时间因驾驶员、行车速度等因素的变化而不同，日本道路工作者经多次试验，得出反应时间一般在 0.52~1.34s 之间。

### 3. 4 车辆跟驰模型

车辆跟驰模型是交通系统仿真中最重要的动态模型，用以描述交通行为即人—车单元行为。

#### 3. 4. 1 车辆跟驰特性分析

在道路上，当交通流的密度很大时，车辆间距较小，车队中任一辆车的车速都受到前车速度的制约，驾驶员只能按前车提供的信息采用相应的车速，这种状态被称为非自由运行状态。跟驰理论就是研究这种运行状态车队的行驶特性。

非自由状态行驶的车队有如下三个特性：

1. 制约性

在后车跟随前车运行的车队中，出于对旅行时间的考虑，后车驾驶员总不愿意落后很多，而是紧随前车前进，这就是紧随要求。从安全的角度考虑，跟驶车辆要满足两个条件：一是后车车速不能长时间大于前车的速度，而只能在前车速度附近摆动，否则会

发生碰撞，这是车速条件；二是车与车之间必须保持一个安全距离，即前车制动时，两车之间有足够的距离，从而有足够的时间供后车驾驶员做出反应，采取制动措施，这是间距条件。显然，车速越高，制动距离越长，安全距离也相应加大。

紧随要求，车速条件和间距条件构成了一队汽车跟驰行驶的制约性，即前车的车速制约着后车的车速和车头间距。

## 2. 延迟性

从跟驰车队的制约性可知，前车改变运行状态后，后车也要改变。但两车运行状态的改变不是同步的，而是后车运行状态的改变滞后于前车。这是由于驾驶员对于前车运行状态的改变要有一个反应的过程，这个过程包括 4 个阶段，即：

感觉阶段：前车运行状态的改变被察觉；

认识阶段：对这一改变加以认识；

判断阶段：对本车将要采取的措施做出判断；

执行阶段：由大脑到手脚的操纵时间。

这 4 个阶段所需要的时间成为反应时间。假设反应时间为  $T$ ，前车在  $t$  时刻的动作，后车要经过  $(t+T)$  时刻才能做出相应的动作，这就是延迟性。

## 3. 传递性

由制约性可知，第一辆车的运行状态制约着第二辆车的运行状态，第二辆车又制约着第三辆，……，第  $n$  辆车制约着第  $n+1$  辆。一旦第一辆车改变运行状态，它的效应将会一辆接一辆的向后传递，直至车队的最后一辆，这就是传递性。而这种运行状态改变的传递又具有延迟性，这种具有延迟性的向后传递的信息不是平滑连续的，而是像脉冲一样间断连续的。

制约性、延迟性及传递性构成了车辆跟驰行驶的基本特征，同时也是车辆跟驰模型建立的理论基础。

## 3. 4. 2 已有模型概述

一般为简化问题，跟车模型中不反映道路断面的特殊性，即基本路段，匝道，交织区，它们的跟车模型基本形式都是一致的。跟车模型只考虑交通仿真中车辆纵向运行，跟车模型中的跟驰车辆不考虑相邻车道的车辆信息，只考虑与前车的相互作用。

跟驰模型是仿真中的一个重要模型。国内外有大量有关研究。跟驰理论的研究是开始于 50 年代，1950 年 Reuschel 和 1953 年 Pipes<sup>[19]</sup>的对跟驰过程的研究，标志着跟驰理论解析方法研究的开始。20 世纪 80 年代以后，跟驰模型研究得到较大发展。新模型或是在吸收前人成果的基础上进行改进，或是从新的研究角度和方法来分析问题。根据各模型假设的特点按不同的属性可以将这些模型分成不同的类型。按照跟驰车的加速度与前后车相对速度的线性关系可分为：线性跟驰模型与非线性跟驰模型；按照产生机理可分为：基于刺激—反应模型、生理心理模型、基于安全车头间距的跟驰模型（简称安全距离模型）、基于模糊推理系统的跟驰模型。

### 1. 刺激—反应模型

刺激—反应模型重在描述驾驶环境中各种刺激对驾驶员行为的影响，包括 GM 模型和线性模型。

#### 1) GM 模型

GM 模型是刺激—反应模型的代表，它是 50 年代后期和 60 年代早期，由通用汽车公司研究组的 Herrman 等开发的。其原理是：跟驰车的反应通过加速度体现，其值等于驾驶员的敏感性与单位刺激强度的乘积，即：反应  $(t+T) = \text{灵敏度} \times \text{刺激} (t)$ 。GM 模型基于如下假设：在时间  $t+T$  内跟驰车的反应依赖于跟驰车对刺激的敏感度和前车所给的刺激强度，

刺激强度以前车与跟驰车之间的相对速度、距离的形式给出, 跟驰车的反应通过加速度测得, 敏感特性描绘出单位刺激的反应,  $T$  为反应时间。GM 模型的一般形式如下式:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \frac{\alpha_{l, m} [\dot{x}_{n+1}(t+T)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (3-15)$$

式中:  $l$ —对距离  $x_n(t) - x_{n+1}(t)$  的敏感性参数;

$m$ —对速度  $\dot{x}_{n+1}(t+T)$  的敏感性参数;

$\alpha_{l, m}$ —常数。

GM 模型形式简单, 物理意义明确, 作为早期的研究成果, 具有开创意义, 许多后期的车辆跟驰模型研究都是源于刺激-反应基本方程。但是 GM 模型的通用性较差, 现在较少使用 GM 模型, 这是因为在确定  $m$  和  $l$  的过程中存在大量的矛盾之处。造成矛盾的原因可能有两个: 第一, 跟驰行为非常易于随着交通条件和交通运行状态的变化而变化; 第二, 大量的研究和实验是在低速度和停停走走的交通运行状态中进行的, 而这种状态的交通流不能很好的反映一般的跟驰行为。

## 2) 线性跟驰模型

根据跟驰车队的特性, 图 3-1 中第  $n+1$  号车在  $t+T$  时刻的速度可用下式表示

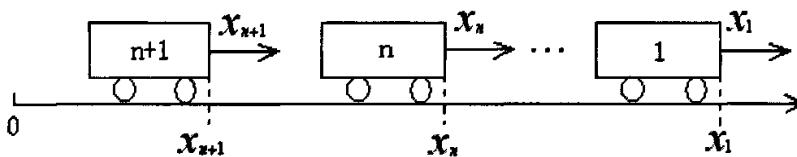


图 3-1 车辆跟驰运动示意图

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda[x_n(t) - x_{n+1}(t)] + \lambda L \quad (3-16)$$

式中  $x_n(t)$ —在  $t$  时刻, 第  $n$  号车 (引导车) 的位置;

$x_{n+1}(t)$ —在  $t$  时刻, 第  $n+1$  号车 (跟随车) 的位置;

$\lambda$ —反应灵敏度系数 ( $1/s$ );

$L$ —在阻塞情况下的车头间距。

对于跟驰车辆的反应, 一般指加速、减速, 因此, 将式 3-16 微分, 得到:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (3-17)$$

式中  $\ddot{x}_{n+1}(t+T)$ —在延迟  $T$  时间后, 第  $n+1$  号车的加速度;

$\dot{x}_n(t)$ —在  $t$  时刻, 第  $n$  号车的速度;

$\dot{x}_{n+1}(t)$ —在  $t$  时刻, 第  $n+1$  号车的速度。

式 3-17 的意义, 可以理解为

$$\text{反应 } (t+T) = \text{灵敏度} \times \text{刺激 } (t)$$

该式说明, 在  $(t+T)$  时刻, 第  $n+1$  号车驾驶员发生的反应, 是按第  $n$  号和第  $n+1$  号车

的相对速度正(负)差额成比例地加(减)速,而灵敏度则可用(1/s)度量。研究表明  $T = 1.0 \sim 2.2s$ ,对于50%的驾驶员,  $T$  约为 1.5s。

式 3-17,由于跟驰车的加速度与两车相对速度成线性关系,故称为线性跟驰模型。

## 2. 生理—心理模型

生理—心理模型也称反应点模型 (Action Point Models, 简称 AP 模型)。这类模型用一系列阈值和期望距离体现人的感觉和反应,这些界限划分了不同的值域,在不同的值域,后车与前车存在不同的影响关系。生理—心理模型是一种跟驰决策模型 (Car Following Decision Model)。

1963 年 Michaels<sup>[20]</sup> 通过分析司机生理和心理一些潜在的因素,首次提出生理—心理跟车模型的理念:司机通过分析视野中前车尺寸大小的改变,即前车在司机视觉中投影夹角的变化,感知前后车相对速度的变化,根据感知阈值,判断是否正在与前车接近,一旦超过这个阈值,司机将选择减速,使对相对速度的感知不超过这个阈值。是否能够感知到前车的变化是司机进行驾驶操作的基础。由生理—心理模型的原理可以看出,阈值的确定是生理—心理模型的核心内容,既是重点也是难点。

## 3. 安全距离模型

安全距离模型也称防撞模型 (Collision Avoidance Models, 简称 CA 模型),该模型最初由 Kometani 和 Sasaki<sup>[21]</sup>提出,该模型最基本的关系并非 GM 模型所倡导的刺激—反应关系,而是寻找一个特定的跟驰距离(通过经典牛顿运动定律推导出)。如果前车驾驶员作出了一个后车驾驶员意想不到的动作,当后车与前车之间的跟驰距离小于某个特定的跟驰距离时,就有可能发生碰撞。Gipps<sup>[22]</sup>开发了一个在自由流状态和跟车状态下都可以使用的一般性跟车模型,该模型假设:跟驰车在跟随行驶过程中将与前车保持一个安全距离,以便在前车突然减速时能把车速降低到一个安全水平或是完全停下来。跟驰车在时刻  $t+T$  的车速可以由下式计算:

$$v_n(t+T) = \min \{v_n(t) + 2.5a_n T [1 - v_n(t)/V_n] [0.025 + v_n(t)/V_n]^{1/2}, \\ b_n T + \sqrt{[b_n^2 T^2 - 2b_n [x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_n(t) - v_n(t)T] - b_n v_{n-1}^2(t)/\hat{b}]} \} \quad (3-18)$$

式中:  $a_n$ —车辆 n 的驾驶员所愿采用的最大加速度;

$b_n$ —车辆 n 的驾驶员所愿采用的最大减速度;

$V_n$ —车辆 n 的期望速度;

$S_{n-1}$ —车辆 n-1 的效用尺寸,其值等于车身长度加停车间距;

$\hat{b}$ —车辆 n 的驾驶员认为车辆 n-1 会采用的最大减速度。

上式右端共有两项:第一项由两个限制条件合并而成,即期望车速限制和由汽车动力特性决定的加速度限制,当该项对大多数车辆起作用时,交通流处于自由行驶状态;第二项是防止碰撞限制,当它起作用时,交通流处于拥挤状态。 $v_n(t+T)$  取值可以在两式之间平滑地转换。

该模型可以用一些对驾驶行为一般感性假设来标定模型。大多数情况只需知道驾驶员将采用地最大制动减速度,就能满足真个模型地需要。尽管该模型能够得出可以令人接受地结果,但仍然有许多问题有待解决,例如,避免碰撞的假设在模型的建立中是合乎情理的,但

与实际情况存在着差距；在实际的交通运行中，驾驶员在很多情况下并没有保持安全距离行驶，造成这种情况的原因是多方面的，如驾驶员可以看到前方不止一辆前导车，而且还有其他车辆及诸如远方信号灯等交通信息，驾驶员综合判断这些信息后，能及时对前导车的变化作出反应。

#### 4. 模糊推理模型

现有跟驰模型都以一种明确的方式来描述驾驶员的行为，实际上驾驶员对前导车变化的反应不是明确的一对一关系，而是基于经验中得出来的一组潜意识的驾驶规则。针对这种情况，kikuchi 和 Chakroborty<sup>[23]</sup>等提出基于模糊推理系统的跟驰模型，其中模糊推理系统是由基于驾驶规则的直接自然语言组成，此系统能预测跟驰车反应并通过模糊隶属函数表达其范围。用模糊推理方法来研究跟车模型的初衷是模糊化传统 GM 模型中的  $\Delta x$ ， $\Delta v$  和  $a_{n-1}$ ，该方法把  $\Delta x$ 、 $\Delta v$  和  $a_{n-1}$  作为输入集，并把每个模糊集分为 6 个等级，三个模糊集之间彼此相关。模糊推理模型的具体表达如下：

$$\text{IF } \Delta x = \text{'ADEQUATE'} \quad \text{THEN} \quad a_{n-1} = (\Delta v_i + a_{n-1,i} x T) / \gamma$$

ADEQUATE 表示如果两车的距离足够大，则后车采用  $a_{n-1}$  这个加速度行驶。

式中： $T$ —反应时间，取 1s；

$\gamma$ —后车司机希望在  $\gamma$  时间内能够跟上前车，取 2.5s。

### 3. 4. 3 模型评价

GM 模型形式简单，物理意义明确，并且作为早期跟驰模型的研究，具有一定的开创意义。许多后期的跟驰理论研究都是基于其建立的反应—刺激方程。并且，GM 模型用数学方法由微观模型能够推导出宏观交通流模型，在微观交通流与宏观交通流之间架构起桥梁。虽然近期的研究热点集中于限制性模型和生理—心理模型的比较多，但 GM 模型有丰富的资料和数据支持，广泛的应用证明了其可靠性，加上它的物理意义明确，因此 GM 模型依然是现存大多数微观交通仿真模型所采用。然而 GM 模型也存在一些缺陷，如在前后两车车速相同时允许两车的车头间距无限减少直至为零等。需要进行改进。

基于驾驶员生理—心理的多段式模型最大优点在于：充分考虑了不同交通环境下，驾驶员的不同反应，从建模方法上更接近实际状况。其缺点在于对各种阈值的调查测量是非常困难的。而且在运用于其它的交通环境下时，难以评价原有的参数适用性。现有的阈值确定方法是根据人对其视野中物体的角速度变化的最小可感知值来定，但实测数据中大量存在超过阈值而未反应的事例，因此，仅根据阈值来划分跟驰状态值得进一步探讨。

基于安全车头时距的跟驰模型的研究在一定程度上就是寻求驾驶员冒险与保守的行驶方式中的一个平衡点。避免碰撞的假设在模型的建立中是合乎情理的，但与实际情况存在着差距。在实际的交通运行中，驾驶员在很多情况下并没有保持安全距离行驶。造成这种情况的原因是多方面的。1)、在实际交通环境中，前导车极少采用“挡墙式”制动，驾驶员可以看到前方不止是一辆前导车，而且还有其他车辆以及诸如远方信号灯等交通信息，驾驶员综合判断这些信息后，能及时对前导车的变化作出反应，造成驾驶员趋于采用冒险的方式进行驾驶；2)、跟驰车的驾驶员一般会假定前车不会突然停止至少不会突然急刹车，因此跟驰时会比理论上跟接近前车一些；3)、在实际的情况下，如果相邻车道有足够大空间，跟驰车在过于接近前车时有机会换车道，驾驶员也会采用较近跟驰。所以跟驰车在利用基于安全间距的跟驰模型进行通行能力的分析，很难与实际最大交通量吻合。

基于模糊推理系统的跟驰模型与传统 GM 模型相比，该模型具有局部稳定性。最终的跟

车距离仅与最终速度有关而与初始跟车距离和速度无关。虽然这种模型在总体上能够预测“反应”的变化，但有两个因素可能导致与实际有出入：一个是该模型认为能够精确地得出 $a_r$ 为 $0.3\text{m/S}^2$ ，这是否可能非常值得探讨；另一个是已经从线性跟车模型中得知 $\Delta x$ 对加速度的影响非常小。由于对驾驶规则的抽取以及隶属函数确定比较困难，因此，这种模型的精度及实用价值受到了一定的影响。

## 3. 5 换车道模型

### 3. 5. 1 已有模型概述

换车道模型也是微观交通仿真中的重要模型。车辆的换车道行为是司机根据道路条件、交通条件为获得最大驾驶满意度或达到自己的驾驶目标策略实施的车道变换行为。换车道模型通常划分为两种：强制性换车道模型（mandatory lane changing）、判断性换车道模型（discretionary lane changing）。强制性换车道缺少行为需求产生环节，即在这种情况下只要目标车道出现可插入间隙就实施换车道，模型核心内容是间隙接受模型，应用中的换车道行为主要指交织区的交织车辆行为与匝道中的汇入车辆行为，另有少部分指高速公路避免前方障碍物的车辆行为；判断性换车道具有需求产生环节。司机需要对当前行驶状态作出分析，当本车道的行驶条件不能使司机得到满意的驾驶，则产生换车道需求，并根据相邻车道交通条件做出换车道决定。一般来说，发生判断性换车道行为动机主要有：提高车速；超过慢车；交织区内躲避交织车辆。

#### 1. 判断性换车道模型

与强制性换车道行为相比，判断性换车道中需求产生是一个重要组成部分，也就是说，什么时刻司机要换车道，什么时刻不换。这一过程的发生是比较难以把握的，通过对驾驶员换车道行为的分析，可以将驾驶员对换车道的判断过程分为以下4个阶段：

##### 1) 是否需要更换车道？

当跟驰车辆的加速度小于某一数值时，驾驶员不满意该行驶状态，则考虑能否换车道。

##### 2) 在目标车道上行驶是否会改善行车状况？

驾驶员换车道是为了获得更好的行驶状态，当车辆在目标车道上的满意行驶时间比在当前车道上的满意行驶时间大于某一数值时，车辆就有换车道的需求产生。

##### 3) 选择何种换车道方向？

在以右侧行驶为交通规则的情况下，驾驶员选择换车道的方向通常是左侧。观测表明，向左变换车道的概率是向右的4倍。驾驶员在选择换车道的方向时，主要考虑的是左侧车道和右侧车道的驾驶利益的不同。

##### 4) 是否有可能进入目标车道？

换车道必须满足安全要求，即一方面换车道后不至于与目标车道中的前车发生冲突；另一方面也不至于与目标车道中的后车发生冲突。满足这两个条件才能进行成功的换车道行为。

在判断性换车道模型中，首先要判断是否有换车道的需求。需求产生后，由普通的间隙接受理论检测间隙是否接受，如果间隙不接受，此次需求结束；如果间隙接受，换车道行为执行。由此可见，判断性换车道的过程由需求、检测、执行这三个步骤组成。如图3-2所示

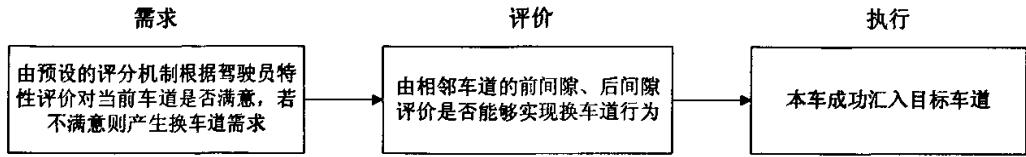


图 3-2 判断性换车道流程

从当前应用的换车道模型来看，需求产生算法主要有两种方式：PLC 法、综合评价法。

PLC (Probability of Lane Changing) 即换车道概率法。这种方法应用简单的驾驶满意状态的评价指标，对于处于不满意状态的车辆，由概率分布的方式初始化哪些车辆有换车道需求。例如在 WEAVSIM 模型中，对于所有非交织车辆，以  $PLC = 0.04$  来决定谁产生判断性换车道需求。在早期的仿真模型中，PLC 方法应用很广泛，直至现在，在很多模型中依然在沿袭这种方法，只是在 PLC 的应用范围上加了限制条件，力求使模型的适用性得到增强。

在 MRS (Multi-Regime Simulation) 模型中采用的换车道判断标准，需要满足下列多重条件才进行 PLC 分布：

$$\begin{aligned}
 & gap(i) < l \\
 & gap_0(i) > l_0 \\
 & gap_{0,back}(i) > l_{0,back} \\
 & \dot{x}_{\text{目标车道前车}} > \dot{x}_{\text{当前车道前车}} \\
 & \dot{x}_{\text{目标车道前车}} > \dot{x}_{\text{本车}}
 \end{aligned}$$

其中

$\dot{x}$  — 车辆速度；

$gap(i)$  — 当前车道上的前间隙；

$gap_0(i)$  — 目标车道上的前间隙；

$gap_{0,back}(i)$  — 目标车道上的后间隙；

$l, l_0, l_{0,back}$  — 分别为预定义的车头间隙、临界间隙、临界后间隙；

综合评价法满足了驾驶员驾驶策略中的实际需求过程，在模型的适用性、可转移性等方面更为可靠，如 TSIS 中的 NETSIM 模型就采用该方法。但这种方法较为复杂，一般较为少用。

间隙检测就是评价相邻车道是否有合适的间隙允许安全的执行换车道。当产生了换车道需求，就立即调用寻找间隙算法。

与跟驰模型紧密结合在一起，判断当前间隙实施换车道是否引起车辆跟驰状态的变化，是间隙检测的主要方法。包括主车是否能够安全跟驰目标车道前车。目标车道跟车是否能够安全跟驰主车。INTRAS 与 WEAVSIM 的模型都是采用这种方法（如图 3-3），

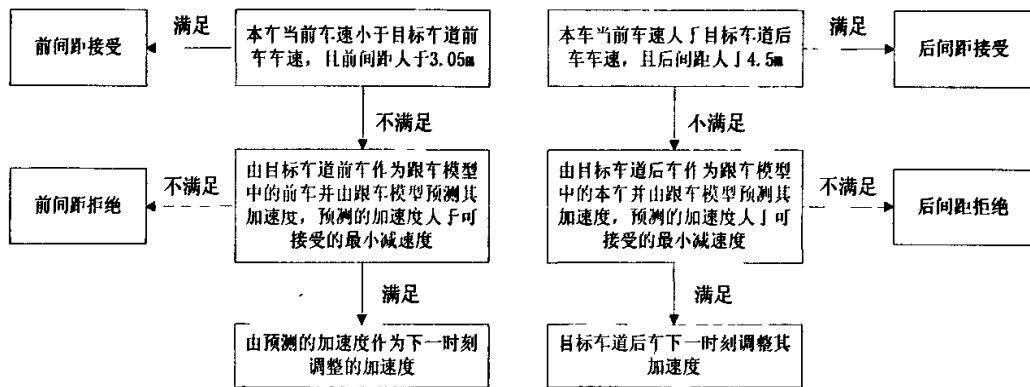


图 3-3 间隙检测算法

Masahiro Kojima<sup>[24]</sup>用安全系数来评价间隙是否接受，当目标车道的前、后间隙都满足安全系数时，则间隙接受，表达式见式 3-19

$$\text{Safety Value} = \frac{S - P - \frac{1}{2\bar{D}}(f_v - b_v)^2}{b_v} \quad (3-19)$$

式中： $S$ —最小期望间距；

$P$ —车长；

$\bar{D}$ —平均减速度；

$f_v$ —前车位置；

$b_v$ —主车车速。

在 CORSIM<sup>[25]</sup>中，也是由司机的可接受风险来评价间隙是否接受的。

$$\text{Acceptable Risk} = D_{\min} + (D_{\max} - D_{\min}) \frac{\sqrt{U - U_t}}{1 - U_t} \quad (3-20)$$

$$U = DAF \times NLC \times V_f^2 \div [20(x - x_0)]$$

式中： $D_{\min}$ —可接受的最小减速度；

$D_{\max}$ —可接受的最大减速度；

$U$ —风险系数；

$U_t$ —风险阈值，缺省值为 0.2；

$DAF = [1.0 + (\text{司机类型-5.5})]/F_{DA}$  ( $F_{DA}$  为司机倾向性指标)；

$NLC$ —变换车道所需的次数，判断性换车道为 1；

$V_f$ —车辆的自由期望运行车速；

$x$ —车辆的当前位置；

$x_0$ —引起换车道行为的目标所在位置。

MITSIM 中判断性换车道的最小可接受间隙定义如式 3-21 和式 3-22：

$$g_{na} = \max\{g_a, g_a + \beta_{a1}v_n + \beta_{a2}(v_n - v_a) + \varepsilon_{na}\} \quad (3-21)$$

$$g_{nb} = \max\{g_b, g_b + \beta_{b1}v_b + \beta_{b2}(v_b - v_n) + \varepsilon_{nb}\} \quad (3-22)$$

## 2. 强制性换车道模型

强制性换车道缺少需求产生环节，其核心内容自然集中在间隙接受模型。根据接受间隙算法的不同，强制性换车道行为主要分为强制请求和判断请求两种。

强制请求即假设车辆初始化时就具有换车道需求并不停的检测目标车道的车辆接受间隙从而尝试完成换车道，此时刻接受间隙不满足条件，下一时刻继续发送这样的请求，直至条件满足换车道行为成功完成为止，整个过程是一个不断发送请求直至请求满足的连续过程。模型这样描述，可以在有限的交织长度内，使大量的交织车辆顺利完成换车道而不至于在交织区的尽头停车等待以期待间隙汇入。司机对间隙的综合判断能力使他能够充分利用每一个可接受间隙，而模型算法则不具备这种能力，因而在每一步长中都进行这种检测以弥补这一不足。

图 3-4 是强制请求间隙寻找示意图。图中车 n 为了从加速车道换入主线外侧车道，不断检查间隙  $g_{bn}$  和  $g_{na}$ ，当两者满足要求即开始换车道。

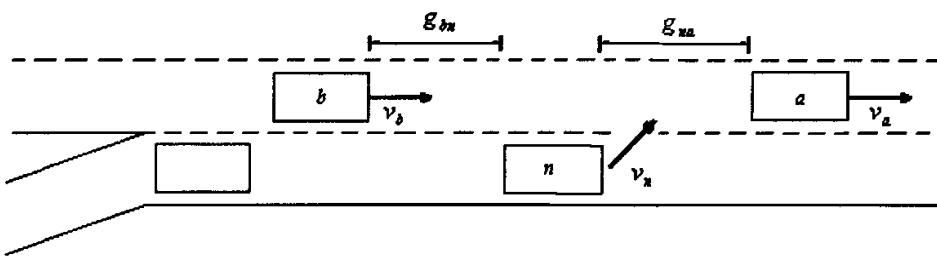


图 3-4 强制请求间隙寻找示意图

Yang 和 Koutsopoulos(1996)<sup>[26]</sup>在 MITSIM 中最初采用基于 Gipps<sup>[27]</sup>的换车道模型。该模型强制性换车道最小可接受间隙是距离和速度的函数，见式 3-23、3-24。

$$g_{na} = \max\{g_a, g_a + [\beta_{a1}v_n + \beta_{a2}(v_n - v_a)][1 - \exp(\gamma x_n^2)] + \varepsilon_{na}\} \quad (3-23)$$

$$g_{bn} = \max\{g_b, g_b + [\beta_{b1}v_b + \beta_{b2}(v_b - v_n)][1 - \exp(\gamma x_n^2)] + \varepsilon_{bn}\} \quad (3-24)$$

$x_n$ —车辆 n 到必须换车道点的距离；

$\beta$ ， $\gamma$ —模型参数；

$\varepsilon$ —随机项。

MITSIM 中最终采用的是 Ahmed<sup>[28]</sup>的换车道模型。该模型基于效用函数标定方法，临界间隙以对数正态分布形式出现，具体形式如式 3-25。驾驶员接受某一间隙前后档的概率如式 3-26：

$$CG_m^g = \exp(\beta^g X_m^g + \alpha_g V_n + \varepsilon_m^g) \quad (3-25)$$

式中， $g$ —区别前后间隙，

$x$ —表示影响因素，

$v_n$ —驾驶员特性项，

$\varepsilon_m^g$ —随机项。

$$P(\text{接受间隙} | v_n) = P(G_g > CG_m^g) = \phi\left(\frac{\ln(G_g) - \beta X_m^g - \alpha_g v_n}{\sigma_g}\right) \quad (3-26)$$

判断请求的换车道车辆在每一仿真步长对相邻的数个间隙同时进行检测，选择满意度大的间隙作为目标间隙调整自身的驾驶行为方式。每一仿真步长都进行这样的操作。从换车道行为发生的整个过程来看，司机的驾驶行为方式在初期表现为寻找间隙，在中期表现为为目标间隙调整车速做汇入的准备，末期则是实施换车道行为。

日本的 Nakamura(1991)<sup>[29]</sup>提出的模型是这方面的代表，它试图从更微观的角度描述车辆选择间隙的过程。其换车道行为方式下图所示。

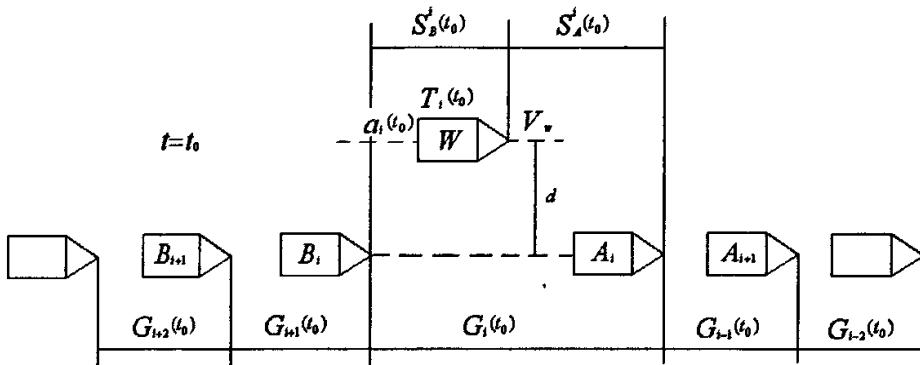


图 3-5 判断请求换车道行为的间隙关系

Nakamura 采用的驾驶行为方式指标是前后间距的相对变化率，他的分析研究结果表明，前后间距的相对变化率  $\psi_i$  可以解释强制性的换车道行为。 $\psi_i$  定义为：

$$\begin{aligned}\psi_A^i(t) &= \frac{V_A^i(t) - V_w(t)}{y_A^i(t) - y_w(t)} = \frac{1}{S_A^i(t)} \times \frac{dS_A^i(t)}{dt} \\ \psi_B^i(t) &= \frac{V_w(t) - V_B^i(t)}{y_w(t) - y_B^i(t)} = \frac{1}{S_B^i(t)} \times \frac{dS_B^i(t)}{dt} \\ \psi_i^{\max} &= \psi_A^i(t) + \psi_B^i(t)\end{aligned}\quad (3-27)$$

式中： $V_A^i(t)$ 、 $V_B^i(t)$ 、 $V_w(t)$  — 在  $t$  时刻车辆 A、B、W 的车速；

$y_A^i(t)$ 、 $y_B^i(t)$ 、 $y_w(t)$  — 在  $t$  时刻车辆 A、B、W 的位置；

$i$  — 一对第  $i$  个间隙。

由上面  $\psi_i$  的定义可以看出在换车道的执行时刻，该值越大，车辆间的间距会有迅速增大的趋势，换车道行为也会越偏于安全。由于在不同加速度  $a_i(t_0)$  和预测的换车道完成时间  $T_i(t_0)$  组合下， $\psi_i$  值是变量，Nakamura 假设司机会选择某一  $a_i(t_0)$  和  $T_i(t_0)$  的组合，使  $T_i$  时刻的  $\psi_i$  值最大，并以此时的  $a_i(t_0)$  作为当前时刻的加速度，进入下一仿真时刻。上面只是针对某一车辆间隙的情况，而对于相邻的五个车辆间隙(位置如图 3-5)，驾驶员都做上述判断，并以具有最大  $\psi_i$  值的间隙作为选择的目标间隙。下一仿真时刻依旧做这样的判断。整个换车道的仿真过程中，就是选择具有最大  $\psi_i$  值的间隙，以及调整加速度在执行换车道的时刻具有最大的  $\psi_i$  值。直到预测的  $T_i$  值减小到 2s，执行换车道行为。

交织区的强制性换车道行为有它的特殊之处，例如车辆越接近交织区末尾，驾驶员可接受的临界间隙越小。另外，有研究认为，可接受的临界间隙大小与交织区的交织车辆所占比例等宏观交织区特性参数也有关系，交织比越大，临界间隙越小。在美国专门描述交织区车

辆行为的仿真模型 WEAVSIM 中, 反映上述两者关系的 LCHF (lane-changing factor) 具有以下的指数形式:

$$LCHF = A + e^{Bx} \quad (3-28)$$

式中:  $x$ —当前车辆与交织区入口的距离;

$LCHF$ —表征换车道行为发生可能性的参数;

初始化条件为:

$$\begin{aligned} LCHF &= 1.0 && \text{当 } x=0.0 \text{ 时;} \\ LCHF &= 1 + \frac{L.WV}{TOT.WV} && \text{当 } x=L \text{ 时;} \end{aligned}$$

式中:  $L$ —交织区长度;

$L.WV$ —当前车道的交织流量;

$TOT.WV$ —交织区的交织总流量。

最终采用的公式形式为:

$$LCHF = e^{\ln(1 + \frac{L.WV}{TOT.WV}) \times x} \quad (3-29)$$

### 3. 5. 2 模型评价

由交织车辆的强制性换车道模型可以看出, 强制请求的实现方法简单明确, 虽然车辆的微观运行过程描述得不够深刻, 但宏观上已经能够表现出交通流的运行特征。判断请求的强制性换车道模型试图从更微观的角度描述车辆运行, 但多数模型实际上就是匝道的汇入模型, 而交织区的车辆交换车道的运行状态与匝道单方面汇入状态有很大的不同。因此, 单纯依靠模型实现双方车辆互动式的换车道行为还有诸多困难。事实上微观仿真的运行机制就是将复杂的交互式的连续过程离散化, 利用相对简单的离散过程实现复杂的连续过程, 如果在离散的过程中强求模型的连续性与复杂性, 则有失偏颇。判断请求的强制性换车道行为与强制请求相比较, 其中涉及的参数和阈值比较多, 数据要求较高, 参数关系复杂, 这类模型的合理性还难以判断。

判断性换车道模型中广泛应用的 PLC 方法并没有从微观上分析车辆的运行规律。需求产生应该是判断性换车道的最主要内容, 单纯用概率统计的方法实现需求显然是该类模型的最大缺陷。判断性换车道在交织区的车辆运行中有重要的作用。造成交织区内车流运行紊乱的原因不仅是存在大量强制性换车道车辆, 由强制性换车道引起车道行驶状态的恶化, 还由此引起大量的判断性换车道行为。如果能合理分析判断性换车道的需求产生, 从微观机理上就可以实现宏观上诸如躲避交织车道之类的车辆运行行为, 并对不同构型的交织区甚至是复杂交织区具有良好的可转移性。

总之, 换车道微观模型的总体水平是建立在假设的基础之上, 且假设的条件多是期望车速、期望运行状态等很难验证与标定的参数, 因此模型的可转移性普遍不强。

### 3. 6 匝道模型

#### 3. 6. 1 合流模型

在入口匝道与高速公路的连接点处, 汇入高速公路的车流与汇入点上游高速公路上的车

流相互竞争，争夺道路空间。影响入口匝道与高速公路的连接点处交通运行的主要因素有道路的几何特性、人-车单元特性、交通流特性和交通管控方式。与高速公路基本路段交通运行的影响因素相比，此处这四个方面中有特点的内容包括：匝道的车道数和平纵线性、匝道的汇入角和加速车道长度；汇入时驾驶员的反应-操作特性；主线和匝道的交通量及其组成、到达分布、车速分布；交通管控方式包括主线限速、入口匝道定时调节、入口匝道感应调节、入口匝道汇合控制、短时禁止驶入、无控制等。

入口匝道仿真建模的关键问题是建立车辆在汇入点处对应各种控制方法的运行逻辑。

例如，对于无控制方式，在交通量较大时，高速公路主线、入口匝道及匝道连接点的交通具有以下的运行特征：

1. 匝道连接区主线上游路段的车辆，一般不会出现变换车道和超车行为，但受汇入车流的影响，主线车辆在匝道连接区可能会由外侧车道向内侧车道转移。即当内侧车道车流有可汇入间隙时，相邻外侧车道车辆汇入该空隙进入内侧车道，同时由于流量增加，超车变得更加困难。

2. 主线车流是主要车流，有优先通行权；匝道车流是次要车流，在主线车流有穿越或汇入间隙时，才能进入主线。主线车流没有足够的穿越或汇入间隙时，匝道车辆将会在匝道上形成排队现象。

3. 匝道车辆进入主线时，与主线车辆主要发生穿插和强制穿插两种运行行为。随着流量的增大，强制穿插行为将有所增加，如不对匝道进行控制，有可能使主线车流也会在汇入点前形成排队现象。

4. 主线车流出现足够大的穿越或汇入间隙时，匝道车辆会出现列队进入主线的现象。

在进口匝道加速辅助车道上的合流车，要经历三个阶段最终汇入主线，即间隙寻找，速度调节和实施汇入三个阶段。图 3-6 是该过程的示意图。

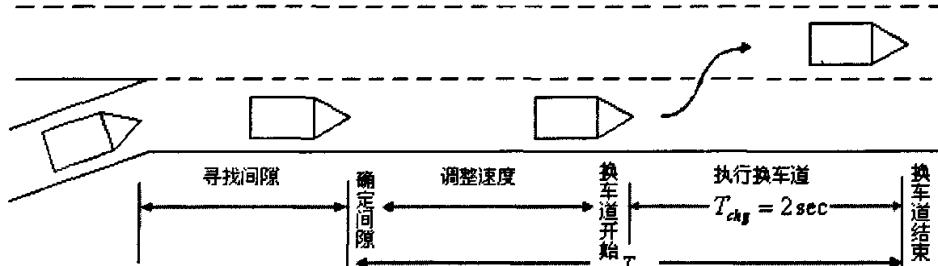


图 3-6 合流区换车道过程

驾驶员是否接受主线上出现的间隙受众多因素综合影响，驾驶员根据这些影响因素的综合效用确定是否接受主线上出现的间隙；若接受该间隙，则驾驶员转入第二步，进行速度调节。反之，驾驶员进入跟车状态，继续寻找间隙，直到接受某一个间隙为止。一旦目标间隙被确定了，驾驶员就调节加速度的大小，以安全性最大为前提，在加速车道所允许的范围内，完成换车道操作。合流车辆调整速度和位置到可以实施换车道以后，开始执行换车道操作，最终实现换车道汇入操作。其流程图见图 3-7。

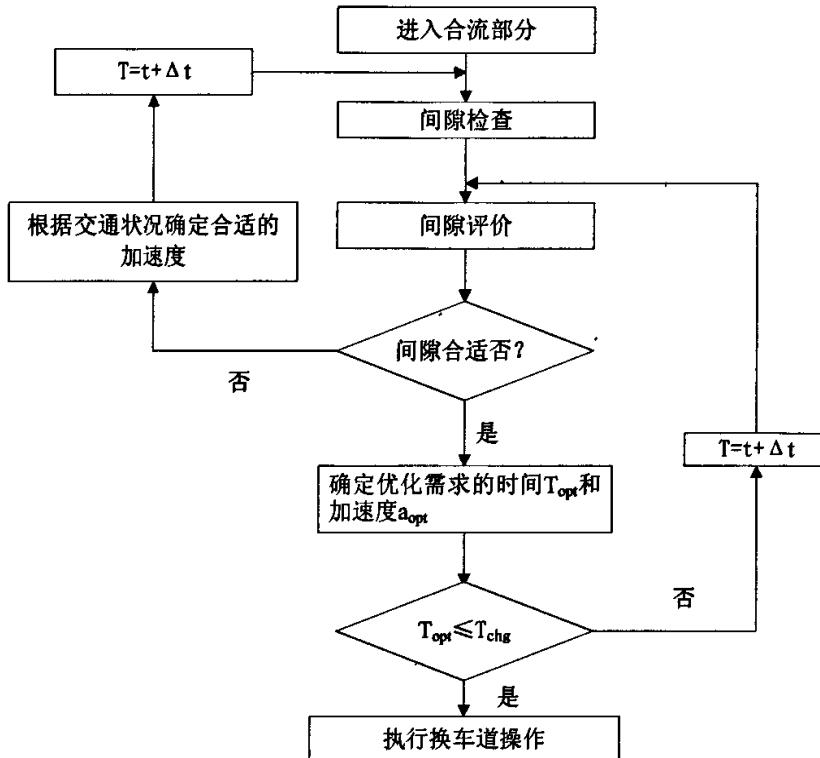


图 3-7 合流区换车道模型流程图

### 1. 间隙寻找。

合流车辆的可接受间隙与驾驶员特性紧密相关, 同时受到车辆的特性、加速车道长度等其它因素的限制。所以, 匝道合流车辆对接受间隙的选择有以下特性: 由于驾驶员有不同的接受习惯, 驾驶员接受某一间隙的时刻和汇入的时刻不同, 因此会造成接受间隙的随机性、不同驾驶员有不同的汇入习惯, 即使是同一个驾驶员在不同时刻接受间隙的大小也可能不同、接受间隙的前后档组合并不是总可以得到的, 随着驾驶员接近加速车道的末端, 合流车辆的驾驶员会变得越来越倾向于接受更小的间隙。根据对驾驶员上述间隙接受行为的描述, 认为驾驶员是否接受间隙符合二项选择的随机特性<sup>[30]</sup>。其表现在于, 一方面, 对于必须实施强制性换车道的合流车辆来讲, 驾驶员面对主线上出现的间隙, 有且仅有两种选择, 即接受该间隙或拒绝该间隙。同时, 驾驶员的判断结果会受到众多因素影响, 驾驶员将根据自己的意愿随机决定是否接受主线上出现的间隙。因此, 驾驶员的间隙选择行为具有很大随机性。采用二项 Logit 概率模型来描述驾驶员选择可接受间隙的二项随机特性, 则驾驶员选择接受和拒绝的概率分别由式 3-30 和 3-31 来表示:

$$P_a = \frac{1}{1 + \text{Exp}[1.805 - 0.19f(L_{rem}) + 1.147G_n(t)]} \quad (3-30)$$

$$P_r = 1 - P_a \quad (3-31)$$

式中  $L_{rem}$  — 剩余加速车道长度;

$G_n(t)$  — 后档的大小;

## 2. 加速度调节

假设合流车辆 W 试图接受相邻车道上车辆 A 和车辆 B 之间的间隙，车辆间的间距关系如下图所示。

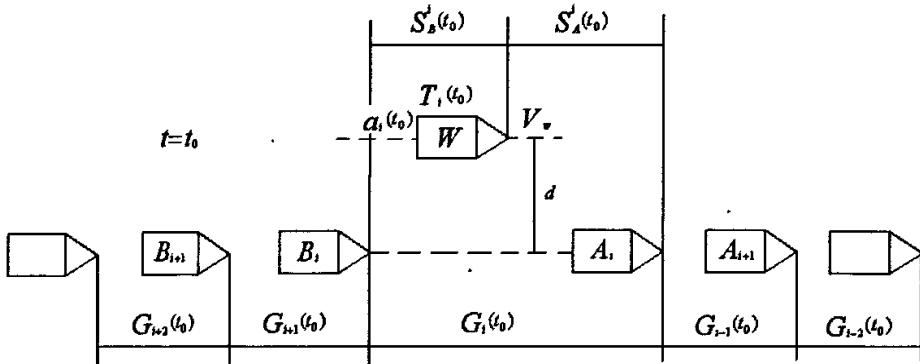


图 3-8 车辆间的间隙和空间位置关系

在  $t$  时刻，合流车辆 W 与车辆 A 的可接受前档空间变化率为  $\psi_A^i(t)$ ，与车辆 B 的可接受后档空间变化率为  $\psi_B^i(t)$ ，由式 3-27 可知：

$$\psi_A^i(t) = \frac{V_A^i(t) - V_w(t)}{y_A^i(t) - y_w(t)} = \frac{1}{S_A^i(t)} \times \frac{dS_A^i(t)}{dt}$$

$$\psi_B^i(t) = \frac{V_w(t) - V_B^i(t)}{y_w(t) - y_B^i(t)} = \frac{1}{S_B^i(t)} \times \frac{dS_B^i(t)}{dt}$$

$$\psi_i^{\max} = \psi_A^i(t) + \psi_B^i(t)$$

式中： $V_A^i(t)$ 、 $V_B^i(t)$ 、 $V_w(t)$  — 在  $t$  时刻车辆 A、B、W 的车速；

$y_A^i(t)$ 、 $y_B^i(t)$ 、 $y_w(t)$  — 在  $t$  时刻车辆 A、B、W 的位置；

$i$  — 一对第  $i$  个间隙。

空间上的相对变化率是正值并逐渐增加，意味着车辆间的相对空间位置增加，则换车道行为更安全。反之，若空间上的相对变化率为负值，则实施换车道的危险性就越大。在实际交通情况下，空间上的相对变化率随时间不同而不同。

在文献 31 中，选用该指标作为换车道的评价标准来描述换车道的特性。在换车道完成的时刻，对于接受间隙  $G_{i_0}$  来说， $\hat{\psi}_A(t_0 + T_i(t_0))$  和  $\hat{\psi}_B(t_0 + T_i(t_0))$  是加速度  $a_i(t_0)$  和完成合流所需要时间  $T_i(t_0)$  的函数。因此它的形式可以改写为如下两式：

$$\hat{\psi}_A(t_0 + T_i(t_0)) = \hat{\psi}_A^i(a_i(t_0), T_i(t_0)) \quad (3-32)$$

$$\hat{\psi}_B(t_0 + T_i(t_0)) = \hat{\psi}_B^i(a_i(t_0), T_i(t_0)) \quad (3-33)$$

下一时刻合流车辆的加速度大小数学表达式如下：

$$\text{Max} \hat{\psi}_i(a_i(t_0), T_i(t_0)) = \hat{\psi}'_A(t_0 + T_i(t_0)) + \hat{\psi}'_B(a_i(t_0), T_i(t_0)) \quad (3-34)$$

约束条件为：

$$\hat{\psi}'_A(t_0 + T_i(t_0)) \geq -0.1 \quad [\text{sec}^{-1}] \quad (3-35)$$

$$\hat{\psi}'_B(t_0 + T_i(t_0)) \geq -0.1 \quad [\text{sec}^{-1}] \quad (3-36)$$

$$\hat{S}'_A(t_0 + T_i(t_0)) \geq 10 \quad [\text{m}] \quad (3-37)$$

$$\hat{S}'_B(t_0 + T_i(t_0)) \geq 10 \quad [\text{m}] \quad (3-38)$$

$$T_i(t_0) \geq 2 \quad [\text{sec}] \quad (3-39)$$

$$\hat{Y}_w(t_0 + T_i(t_0)) \leq L \quad [\text{m}] \quad (3-40)$$

式中， $T_i(t_0)$ —对于间隙 $G_i(t_0)$ 在时刻( $t=t_0$ )，预计完成合流所需要的时间，s；

$\hat{S}'_A(t_0 + T_i(t_0))$ —在预计合流车辆完成换车道的时刻( $t=t_0 + T_i(t_0)$ )，前导车和合流车辆的空间预计值，m；

$\hat{S}'_B(t_0 + T_i(t_0))$ —在预计合流车辆完成换车道的时刻( $t=t_0 + T_i(t_0)$ )，后随车和合流车辆的空间预计值，m；

$\hat{Y}_w(t_0 + T_i(t_0))$ —在时刻( $t=t_0 + T_i(t_0)$ )预计车辆完成换车道的时刻，合流车辆的空间位置，m；

$L$ —加速车道的长度，m。

在约束条件中，不等式 3-34 和 3-35 是基于换车道完成时刻目标间隙前后档速度变化的最小值限制。不等式 3-36 和 3-37 是基于换车道完成时刻空间最小值限制。不等式 3-38 是车辆进行换车道操作最长时间限制，也就是说，完成换车道操作的最少时间为 2s，该值近似等于横向移动一个车道的平均时间。不等式 3-39 是换车道必须完成点的位置限制。

采用以上算法，对一个间隙 $G(t_0)$ ，优化值 $a_{opt}(t_0)$ 和 $T_{opt}(t_0)$ 通过计算优化函数计算出来，同时得出 $\hat{\psi}$ 的大小。用 $a_i(t_0)$ 作为合流车辆更新的加速度。

### 3. 实施汇入操作

具体的汇入方式有多种，对于换车道的路线、时间不同模型由不同方式。从经验来说，完成换车道的时间大约是 2s 到 4s，CORSIM 模型中提供默认换车道时间 3s<sup>[32]</sup>。换车道的轨迹线应该满足三点：1、曲线连续；2、容易生成并且适应不同情况，比如不同速度；3、对与车辆来说合理实现。正弦函数可以满足上述要求，则轨迹线方程为式 3-40 和式 3-41：

$$x = x_0 + v * t \quad (3-41)$$

$$y = y_0 + \sin(t/t_1 * \pi - \pi/2) * y_d/2 + y_d/2 \quad (3-42)$$

式中： $v$ —车辆的速度，m/s；

$t_1$ —完成换车道所用的时间, s;

$y_d$ —换车道纵向移动的距离, 一般是车道宽度, m。

### 3. 6. 2 分流模型

分流车辆的换车道过程与合流车辆有着相同之处, 其表现在于: 1)均是在变速车道规定空间范围内, 以保证安全为前提寻找或制造可以接受的间隙, 并调整自身速度的大小, 实现换车道操作的行为。2)在变速车道的影响范围内, 均对最外侧车道影响较大。

同时也可以看出, 分流车辆的换车道行为与合流车辆的换车道行为仍然存在差别, 其不同之处在于: 1)由于具有减速车道的分流过程是将一条车道上的交通量, 通过增加一条车道分流到两条车道上, 增加了车辆行驶空间, 减少了车辆之间的冲突。2)分流车辆是从平均车速较高的车道换到平均车速较低的车道, 分流车辆在行驶时的优先级别比合流车辆高, 因此, 分流车辆换车道的主动性相应就增大了。

出口匝道的分流车辆要离开高速公路, 由于驶出车辆与出口匝道的距离不同, 其换车道模式也存在较大的差别。在图 3-9 所示的三个关键断面处, 断面 1 的换车道行为为直接式, 断面 1 与断面 2 之间的换车道模式为调节式, 断面 2 与断面 3 之间的换车道模式为挤入式。

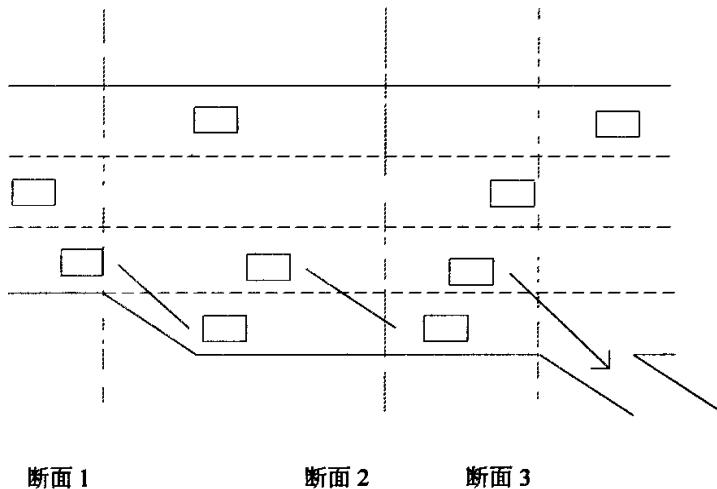


图 3-9 出口匝道换车道模式示意图

**直接式换车道:** 直接式换车道发生在减速车道的最开始处或者是没有减速车道的出口匝道处, 驶出车辆只要判断目标车道中是否存在足够的空间用于换车道就可以执行换车道行为。如果驶出车辆与目标车道中的前车之间的车头时距  $h(t)$  大于 2.0s, 则实施换车道行为, 否则不执行换车道行为。

**调节式换车道:** 调节式换车道发生在减速车道中间路段, 参见图 3-9 中断面 1 与断面 2 之间的部分, 驶出车辆在此行进过程中, 寻找减速车道中最安全的可插入间隙, 调整自身加速度, 以实施分流换车道操作。具体判断过程见图 3-10。

**挤入式换车道:** 挤入式换车道发生在减速车道结束区间, 由于驶出车辆在减速车道对应的路段中没有找到合适的可插入间隙进行换车道, 在减速车道的最后 1/3 路段中, 驶出车辆仅判断减速车道中是否存在足够的空间用于换车道, 就执行换车道行为。如果驶出车辆与目标车道中的前车之间的车头时距大于最小的临界可插间隙 1.0s, 且汇入车辆与后车之间的车头间距大于最小临界可插间隙 2.0s 时, 则实施换车道行为; 否则执行减速停车行为, 并在下一时刻继续寻找临界可插入间隙。

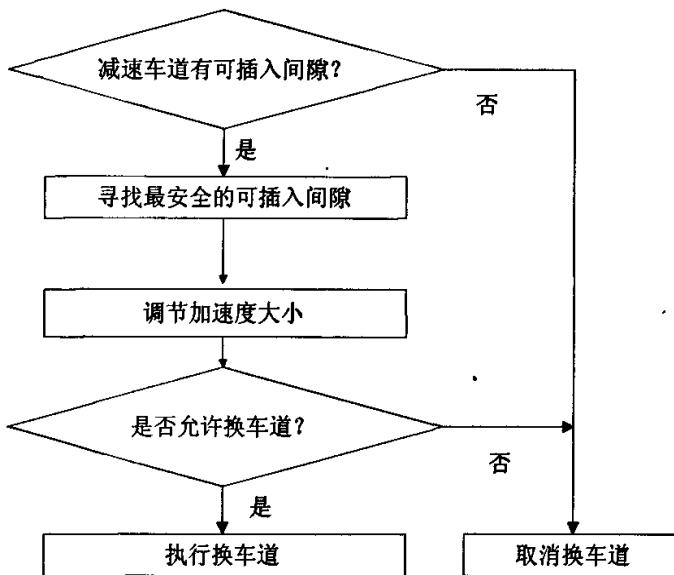


图 3-10 调节式分流换车道判断过程示意图

### 3. 7 收费站服务模型

通过本文 2. 4 对收费站的交通流特性的理论分析, 认为车辆进入收费站接受服务直到驶离有三个步骤。1. 进入收费广场时车辆减速, 寻找排队长度较短或没有排队的收费车道准备驶入, 并进行变换车道行为, 如所选择的收费车道上有排队等候的车辆, 那么就在队尾停车排队等候服务; 2. 车辆从排队停车开始, 就进入收费站排队服务系统, 等待服务, 接受服务; 3. 接受完服务后, 加速离开收费广场并选择合适的高速公路车道进入主线, 驶离收费站。步骤 1、3 可以用车辆跟驰模型、换车道模型较好的描述, 而步骤 2 要采用排队论进行描述。

#### 3. 7. 1 排队系统分析

排队系统分为三个组成部分:

##### 1. 输入过程

是指各种类型的“顾客”(车辆)按怎样的规律到来。如: 定长输入、泊松输入、爱尔朗输入。

##### 2. 排队规则

是指到来的顾客按怎样的规定次序接受服务。主要有三种制式: 1) 损失制: 顾客到达时, 若所有服务台均被占用, 该顾客就随即离去; 2) 等待制: 顾客到达时, 若所有服务台均被占用, 他们就排成队伍, 等待服务。服务次序有先到先服务即按到达次序接受服务, 有优先权服务(如救护车、消防车)等规则; 3) 混合制: 如队长有限制的情况。顾客到达时, 若队长小于  $N$ , 就排入队伍; 若队长等于  $N$ , 顾客就离去。

##### 3. 服务机构

是指同一时刻有多少服务设施可接纳顾客, 为每一顾客服务了多少时间。服务时间分为:

定长分布、负指数分布、爱尔朗分布。

收费站服务系统中，顾客是人—车单元，服务员是每条收费车道的收费站。整个系统为无限顾客总体，系统容量无限，顾客到达是随机过程，排队特性是顾客一旦选择了一个队列只有短时间进行转移，否则，必须等待，排队规则是先进先出，服务时间是随机数量，服务机构由多个并行的服务员组成。

### 3. 7. 2 排队系统性能指标

首先引入服务利用率  $\rho$  的概念。设车辆平均到达率为  $\lambda$ ，则到达的平均时距为  $1/\lambda$ ；排队车辆从单通道接受服务后通过的平均服务率为  $\mu$ ，则平均服务时间为  $1/\mu$ ；比率  $\rho = \lambda/\mu$  就称为服务利用率，可确定各种状态的性质。所谓状态，指的是排队系统的顾客数。如果  $\rho$  小于 1，并且时间充分，每个状态都按一定的非零概率反复出现。当  $\rho$  大于等于 1 时，任何状态都是不稳定的，而排队的长度将会变得越来越长。

排队系统的主要指标有三个：

1. 排队中的平均等待时间：从顾客到达时起至开始接受服务时为止的这段时间；

$$WQ = \frac{\rho}{\mu - \lambda} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (3-43)$$

2. 排队系统中的平均消耗时间：是指顾客在系统内停留的总时间；

$$W = \frac{L}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (3-44)$$

3. 平均排队长度：有排队顾客数与排队系统中顾客数之分，这是排队系统提供的服务水平的一种衡量。

$$LQ = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (3-45)$$

# 第四章 仿真程序设计与开发

本章对仿真程序的设计开发进行了详细的论述，设计了仿真系统整体框架，介绍了仿真系统的主要组成部分和功能，结合第三章的仿真模型分析，为程序各模块的组成部分选择了合适的模型，开发了仿真程序，输出评价指标。

## 4. 1 仿真系统整体框架

仿真系统的整体框架分为三个部分：输入模块、仿真模块、输出模块。其结构如图 4-1：

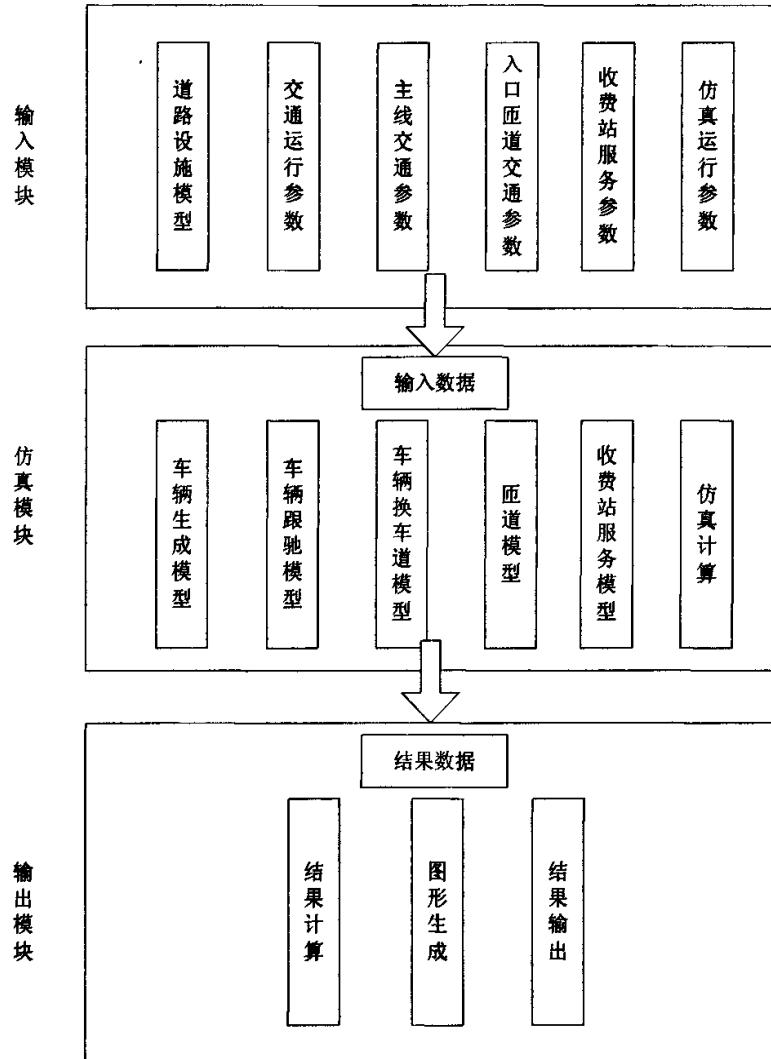


图 4-1 仿真系统整体框架图

输入模块提供一个交互式的编辑环境，包括道路设施模型、交通组成参数、车辆运行参数、仿真运行参数。其中道路设施模型包括高速公路基本路段道路设施，入口匝道、出口匝道设施、收费站道路设施的设置；交通运行参数是由用户输入交通流中小车、中车、

大车的车型比例，各种车型的平均车速；主线交通参数包括主线的小时交通量，下一个出口处车辆驶出比例；入口匝道交通参数主要是入口匝道小时交通量，匝道上车辆的速度；收费站服务参数主要是收费站对各种车型的收费时间；仿真运行参数设计仿真的时间、步长等。

仿真模块利用程序中根据输入模块提供的参数，以及运行程序中设置好的各种交通行为模型，实现车辆生成、车辆运行以及车辆删除工作。

输出模块是将仿真模块生成的数据以动态图像和数据的形式提交给用户。包括两种输出：动画模拟输出和高速公路评价指标输出。动画模拟输出根据仿真计算所得的车辆在每一时刻的更新坐标将车辆在屏幕上画出并擦去原有位置的车辆来实现车流动画；高速公路评价指标输出将仿真模块所计算出的各车道的交通量、主线交通流平均速度、匝道口加、减速路段车辆换车道位置百分比、收费站平均排队延误、总排队延误、服务水平等评价指标通过输出对话框以数据的形式显示出来。

## 4. 2 仿真模块的实现

### 4. 2. 1 输入模块

#### 1. 道路设施模型

高速公路基本路段是指高速公路上不受匝道附近的汇合和分流运行以及交织运行影响的路段。基本路段位于任何匝道和交织影响范围之外。在稳定行驶状态下，高速公路基本路段的范围定为<sup>[36]</sup>：

- 1) 驶入匝道的匝道连接点上游 500 英尺 (153m)，下游 2500 英尺 (765m) 以外；
- 2) 驶出匝道的匝道连接点上游 2500 英尺，下游 500 英尺以外；
- 3) 交织路段汇合点上游 500 英尺，下游 500 英尺以外；

需要指出的是，在阻塞或发生交通事故的情况下，汇合、分流和交织路段会产生规模较大的排队现象，这时原来满足基本路段条件的路段也会受到分、合流和交织影响。

在仿真模型中，假设基本路段的长度为无限长，即在任何拥挤状况下都不受分、合流的影响，这使问题得到了一定的简化。

高速公路的横断面设计标准通常为双向四至八车道，国外有的甚至达到双向十二车道。由于高速公路实行全封闭、全立交、上下行车分离，消除了对向行车的影响，在设计仿真模型时只需要考虑一个方向上的交通情况即可。考虑到我国目前大多数高速公路断面标准都是双向四车道，取研究的车道数为 2 条，包括 1 条行车道和 1 条超车道。

所用道路模型描述理想条件下基本路段的道路情况：

- 1) 车道数：单向双车道；
- 2) 车道宽 3.75m；

匝道设施条件是在高速基本路段设施的基础上，在 400 米处设立一入口匝道、或出口匝道，匝道为单车道，渐变段长度 100m，加、减速车道长 200m。

对于收费站的设施条件，本仿真选取沪宁高速公路无锡东收费站作为仿真对象，该收费站为匝道收费站，出口四车道，入口两车道。上游路段是指由减速渐变路段的起点向上游延伸 150m；下游路段则为加速渐变路段的终点向下游延伸 150m，整个模拟路段长度为 471m。上游路段的内侧车道与外侧车道各自衔接两条收费车道，即上游内侧车道衔接按行车方向由内向外的第一条收费车道和第二条收费车道，上游外侧车道衔接按行车方向由内向外的第三条收费车道和第四条收费车道；下游路段的内侧车道与外侧车道也各自衔接两

条收费车道, 下游内侧车道衔接按行车方向由内向外的第一条收费车道和第二条收费车道, 下游外侧车道衔接按行车方向由内向外的第三条收费车道和第四条收费车道。

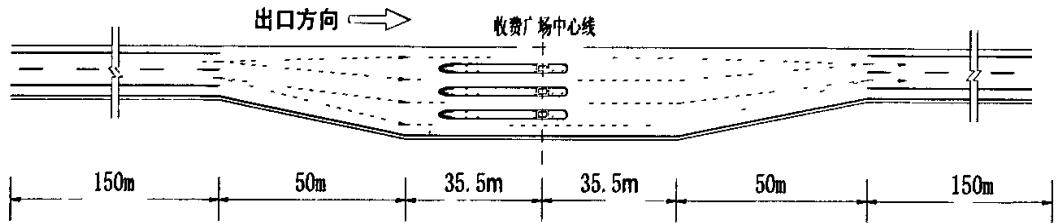


图 4-2 收费站设施设置

## 2. 交通流等其他参数的输入

在仿真开始前, 可以由实验人员手工输入。

### 4. 2. 2 仿真模块

车辆在高速公路上行驶, 必须遵守一定的规则。据我国于 1995 年 3 月 1 日颁布的《高速公路管理办法》, 从中可以总结出高速公路安全行车的一些规则, 研究中假定所有的驾驶员都严格地遵守这些规则, 将这些规则加入仿真模块中, 作为对驾驶员行为限制地描述:

1) 高速公路从沿机动车行驶方向左侧算起, 第一条车道为超车道, 第二、第三条及其他车道为行车道, 车辆只能在超车道和行车道行驶, 允许车辆驶入硬路肩。但模型并未描述硬路肩和紧急停车带。

2) 在没有特别限速的情况下, 机动车在高速公路行驶时, 车速不得低于 50km/h, 小汽车行驶的最高速度为 120km/h, 其他汽车的最高速度为 90km/h。对最低车速的要求意味着车辆只要有加速度可能, 就应当将速度提高到至少规定的最低速度, 否则就将被视为违反规则。最高车速的规定, 则对高速公路的追赶和超车行为进行了限制。

3) 同一车道上的后车与前车必须保持足够的行车间距, 在《高速公路管理办法》中规定: 正常情况下, 时速为 100km/h 时, 行车间距为 100m, 时速为 70km/h 时, 行车间距应为 70m。遇大风、雨、雪、雾气或者路面结冰时, 应当减速行驶。从所给数据可以看出, 规定的行车间距是按 3.6 秒为最小车间时距计算出的。在驾驶模型中, 虽然单元间的行车间距是由后一单元的驾驶员来掌握, 一般情况下驾驶员不会以“危险的”过小车间时距跟驰前车。

4) 本车已接近最高限速且与前车的速度差不是太大时, 不宜超车, 否则将延长超车距离, 且易造成超速行驶。应尽量平稳地超车, 使与被超车辆并行地时间越短越好。超车车辆要超过被超车在安全间距以上时才返回行车道。

5) 机动车在高速公路上正常行驶时, 不准右侧超车。除遇障碍, 发生故障等必须停车的情况下, 不准随意停车。在本文的道路模型中未描述硬路肩和紧急停车带, 所以也没有考虑车辆发生故障驶入和停在紧急停车带地情况。

以上的前提假设是仿真模块中各种模型实现的基础。下面具体讨论仿真模块中各种模型的实现。

#### 1. 车辆生成模型

本仿真选取高速公路主线上车辆到达服从泊松分布, 则车头时距服从负指数分布, 车辆到达满足下式:

$$t = -\lambda \log u \quad (4-1)$$

其中

$t$  — 车头时距;

$\lambda$  — 车辆平均到达率, 辆/s;

$u$  — 采用的均匀随机数,  $u \in (0,1)$ ;

主线上到达速度分布服从正态分布, 因此本仿真中使用正态分布随机变量来描述车辆的到达速度。对于均值为 0, 标准差为 1 的正态分布, 其分布函数为:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4-2)$$

本文采用 Box-Muller 提出的一种用舍选法产生正态分布随机数的方法, 其基本思想为先产生两个均匀分布的随机数  $u_1$  和  $u_2$  使得  $u_1^2 + u_2^2 < 1$ , 然后再做适当的映射。它的理论依据为:

如果  $u_1$  和  $u_2$  为  $(0, 1)$  上的均匀分布, 则

$$x_1 = \sqrt{-2 \ln u_1} \cos(2\pi u_2) \quad (4-3)$$

$$x_2 = \sqrt{-2 \ln u_2} \cos(2\pi u_1) \quad (4-4)$$

是均值为 0, 标准差为 1 的正态分布随机数。

对于非标准正态分布随机数的产生, 如其均值为  $X_0$ , 标准差为  $\sigma$ , 则只需按上述方法产生标准的正态分布随机数  $x$  后, 做如下变化即可:

$$Y = X_0 + \sigma x \quad (4-5)$$

高速公路上车型分布没有唯一性。本仿真程序中, 车型比例作为输入量, 在程序运行前, 由人工输入。各种车型的期望速度, 也由人工输入。

车辆生成后需要对其进行仿真单体初始化。仿真单体初始化是发车时对仿真单体各项参数随机生成的过程, 主要包括以下几个步骤:

- 1) 利用各种分布模型以及输入的参数, 确定车辆单元的基本属性, 包括车型、车头时距、当前车速、期望车速、最大加、减速度、所属车道, 生成服从特定分布的随机数。
- 2) 为了避免车头时距与初始行驶速度不匹配的情况, 利用式 4-6 验证各仿真单体的有效性。如果安全性不足, 则按照特定的分布规律, 重新计算初始速度。

$$V_0 = \frac{V_i(t + t_r) - L_{\text{安全}} - L_i}{t_r} \quad (4-6)$$

式中,  $V_0$  — 仿真单体的初始速度, m/s;

$V_i$  — 前车初始速度, m/s;

$t$  — 计算仿真单体的车头时距, s;

$t_r$  — 计算仿真单体的最小反应时间, s, 通常取 1s;

$L_{\text{安全}}$  — 停车状态时, 最小安全间距, m;

$L_i$  — 前车车长, m。

## 2. 车辆跟驰模型

车辆的行驶状态分为三种: 自由行驶状态, 一般跟驰状态和紧急跟驰状态。这三种状态之间的关系如下图 4-3 所示:

美国《道路通行能力手册》中对于双车道公路延误进行判定时，采用了5s车头时距作为判定标准，认为当车头时距小于该值则处于跟驰状态。根据我国国情，国内学者的研究中提出车头时距为6s的判定标准<sup>[8]</sup>。本文采用车头时距6s，若大于6s，则为自由行驶状态；若处于[2, 6)s之间，则为一般跟驰行驶状态；若小于2s，则为紧急跟驰状态。

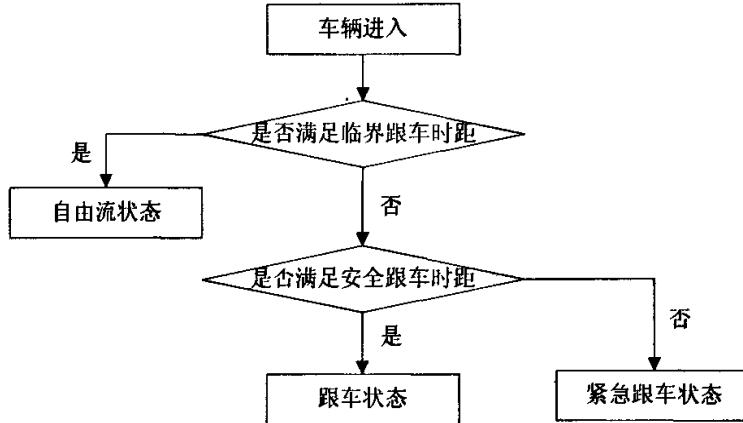


图 4-3 车辆行驶状态关系

### 1) 自由行驶状态

自由流状态下的驾驶员加速到期望车速时，并非采用车辆的最大加、减速度进行操作。而是采用与现在的加速度呈线性关系的函数形式改变速度。在模型中，由于驾驶员采用较大的加速度加速行驶，采用较小的减速度减速行驶。采用式4-7、4-8确定加、减速值。

$$\ddot{x}_n(t)_{Free} = a_{\max}^+ \left[ 1 - \left( \frac{\dot{x}_n(t)}{v_{desired}(t)} \right)^2 \right], \quad \dot{x}_n(t) < v_{desired}(t) \quad (4-7)$$

$$\ddot{x}_n(t)_{Free} = a_{\max}^- \left[ 1 - \left( \frac{v_{desired}(t)}{\dot{x}_n(t)} \right)^2 \right], \quad \dot{x}_n(t) \geq v_{desired}(t) \quad (4-8)$$

其中：

$a_{\max}^+$  — 车辆的最大加速度；

$a_{\max}^-$  — 车辆的最大减速度；

$\dot{x}_n(t)$  — 车辆在t时刻的速度；

$v_{desire}$  — 车辆的期望速度；

期望车速是指一定的道路条件下，没有其他车辆干扰，车辆自由行驶状态下采用的车速。根据参考文献8，不同的交通量和交通组成会导致实测自由流速度相差很大。所以模型中采用实测自由流速度均值作为理想条件下自由流的速度，取自由流车速的85%为各个车道的期望车速。

### 2) 一般跟驰状态

若前后两车之间的车头时距小于6秒并大于紧急跟车状态的阈值时，后车处于跟车状态。根据MITSIM的研究成果，由于驾驶员加速跟驰和减速跟驰表现出来的特性不同，因此需要采用不同的模型参数。本文选用一阶非对称GM跟车模型来体现跟驰状态下加速度的变化，模型形式如下所示：

$$\ddot{x}_{follow}(t+T) = \frac{\alpha_{l,m} [\dot{x}_{follow}(t+T)]^m}{[x_{lead}(t) - x_{follow}(t)]^l} [\dot{x}_{lead}(t) - \dot{x}_{follow}(t)] \quad (4-9)$$

其中：

$\dot{x}_{follow}$ ， $\dot{x}_{lead}$  — 分别为后随车和前导车的速度；

$\ddot{x}_{follow}$ ， $\ddot{x}_{lead}$  — 分别为后随车和前导车的加速度；

$T$  — 为驾驶员的反应时间；

$l$  — 对距离  $x_n(t) - x_{n+1}(t)$  的敏感性参数；

$m$  — 对速度  $\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)$  的敏感性参数；

$\alpha_{l,m}$  — 常量；

对式 (4-3) 的应用需要用实测数据标定其中的参数反应时间  $T$ 、 $l$ 、 $m$  和  $\alpha_{l,m}$ 。

司机反应时间属于驾驶员的特性行为，国内外应有很大差别。借鉴我国交通部“职业驾驶员驾驶适宜性及检测研究”课题组 1990 年和 1996 年在全国部分省市进行的职业驾驶员心理、生理素质随机抽样调查的结果，本文假设司机反应时间为 1s<sup>[15]</sup>。

对  $l$ 、 $m$  和  $\alpha_{l,m}$  的标定在目前国内尚难以做到，本文参照了大量标定过的 GM 模型形式及其背景，最终选定 MITSIM 仿真模型的参数标定，具体值见表 4-1。

表 4-1 GM 模型参数

GM 模型参数	加速度	减速度
$\alpha_{l,m}$	2.15	1.55
$m$	-1.67	1.09
$l$	-0.88	1.66

### 3) 紧急跟驰状态

在主线行驶的车辆，当前后车间的车头时距接近到一定程度时，本文规定车头时距小于 2s 时，车辆为了避免前导车紧急刹车引起追尾，则会在一定车头时距下，开始加大车辆间的车头时距，此时的加速度根据式 4-10 和 4-11 计算：

$$\ddot{x}_{follow}(t+T) = \min \left\{ \ddot{x}_{lead} - \frac{(\dot{x}_{follow} - \dot{x}_{lead})^2}{2(x_{follow} - x_{lead} - L_{lead})}, \ddot{x}_{follow}^- \right\}, \quad \dot{x}_{follow} > \dot{x}_{lead} \quad (4-10)$$

$$\ddot{x}_{follow}(t+T) = \min \left\{ \ddot{x}_{lead}, \ddot{x}_{follow}^- \right\}, \quad \dot{x}_{follow} \leq \dot{x}_{lead} \quad (4-11)$$

式中： $L_{lead}$  — 为前导车车长；

### 3. 车辆换车道模型

在高速公路主线上的换车道行为是判断性换车道行为，司机需要对当前行驶状态作出分析，当本车道的行驶条件不能使司机得到满意的驾驶，则产生换车道需求（如超过慢车、提高车速），并根据相邻车道交通条件做出换车道决定。

本文采用 PLC 法作为换车道需求产生的算法，整个过程分为以下几个过程：

1) 需求产生：当车辆的加速度小于  $0.3m/s^2$ ，速度小于期望车速并且相邻车道的行车速度大于目前行驶车道的速度时，驾驶员不满意该行驶状态，考虑能否换车道；

- 2) 间隙检测：判断车辆与目标车道上前导车和后车的车头时距，是否有可插入间隙；
- 3) 目标车道安全性检验：在换车道后，必须保证目标车道上后车尾随主车行驶、主车尾随前导车行驶时，车头时距大于紧急跟驰间距；若满足要求，则执行换车道行为。

#### 4. 瓶道模型

瓶道模型主要是针对汇入车辆的换车道模型。汇入车辆变换车道进入主线行驶，其换车道模型属于强制性换车道模型。汇合车流在加速车道上的行为可分为三个步骤：间隙寻找，速度调节，实施汇入，如图 3-6。本文根据这三个步骤模拟入口瓶道处换车道行为：

##### 1) 间隙寻找

合流车辆进入合流变速车道后，驾驶员根据目前所处位置、速度等状态寻找可接受间隙。严格地说，并不存在一个明确的临界可接受间隙，使所有驾驶员都依此为判断标准。驾驶员是否接受一个间隙不是一个确定性的行为，即只要主线上出现的间隙大于临界间隙就接受，小于临界间隙就拒绝。而是受到其他众多因素的影响，如车辆目前所在位置，合流车辆与直行车辆相对速度等。

根据对驾驶员上述间隙接受行为的描述，认为驾驶员是否接受间隙符合二项选择的随机性。本文采用 Logit 模型，确定驾驶员接受间隙和拒绝接受的概率分别为：

$$P_a = \frac{1}{1 + \text{Exp}[1.805 - 0.19f(L_{rem}) + 1.147G_n(t)]} \quad (4-12)$$

$$P_r = 1 - P_a \quad (4-13)$$

式中  $L_{rem}$  — 剩余加速车道长度；

$G_n(t)$  — 后挡的大小；

##### 2) 加速度调节

一旦目标间隙被确定了，驾驶员就应当调节加速度的大小，以安全性最大为前提，在加速车道所允许范围内，完成换车道操作。调整的加速度大小将根据汇入车辆与主线上相邻车辆的安全车头时距以及可插入间隙的大小来计算，并且与前一时刻的加速度衔接，需要加入一个横向加速度，实现横向位移。

##### 3) 实施汇入

合流车辆调整到可以实施换车道的速度和位置后，开始执行换车道操作，实现换车道操作。完成换车道所需时间为 2s，最大不能超过 4s，本文选定换车道时间为 3s。当合流车辆横向位移的值等于一个车道的宽度时，认为车辆完成了换车道操作。

##### 4) 汇入车辆其他参数的设定

入口瓶道车辆的到达同样服从泊松分布，速度服从正态分布但比主线车流速度小，交通量参数、车型比例在程序运行前输入。同样要对瓶道车辆进行初始化处理。

#### 5. 收费站模型

本文中对收费站的仿真分为以下三个步骤：

##### 1) 车辆在上游路段及进入减速渐变路段。

在这一步中，行驶车辆就开始根据收费口车辆的排队长度，就近选择排队长度较小的收费口进入接受服务。选择好收费入口后，车辆将进行变换车道行为。在上游路段和减速渐变路段的换车道行为属于强制换车道行为，当车辆不在其目标车道时，强制性换车道的行为动机发生，其换车道行为与入口瓶道换车道模型一致。

##### 2) 车辆进入收费站接受服务

车辆刚进入收费路口时保持匀速行驶, 至收费处速度为 0, 开始接受服务。通过实地调查, 收费系统出口的服务时间和离去时间服从为正态分布, 并分别对大、中、小车的服务时间进行了调查整理, 调查的服务时间包括纯粹服务时间和离去时间, 利用卡方检验对样本进行分布拟合检验, 并采用极大似然估计法对正态样本的特征参数—数学期望  $\mu$  和方差  $\sigma^2$  进行估计。在 0.05 的显著性水平上, 具体检验结果和特征参数估计值见表 4-2。由表中可以看出, 卡方检验通过, 本收费站服务时间的分布均符合正态分布, 计算得到的大、中、小车服务时间的期望值和方差作为本文仿真程序的输入值。

表 4-2 封闭式出口车道服务时间分布检验和特征参数

车型	小型车			中型车			大型车		
	卡方检验	期望 (s)	方差 (s <sup>2</sup> )	卡方检验	期望 (s)	方差 (s <sup>2</sup> )	卡方检验	期望 (s)	方差 (s <sup>2</sup> )
服务时间特征参数	0.89	11.3	5.6	0.63	13.2	6.7	0.35	15.9	8.4

### 3) 车辆驶出收费站进入加速渐变路段以及下游路段

这一步中, 车辆开始加速行驶并调整车道, 换车道同样采用就近原则, 即从 1、2 号收费口驶出的车辆一般选择内侧车道, 3、4 号收费口驶出的车辆选择外侧车道。在收费站加速渐变路段和下游路段的车辆的换车道行为属于判断性换车道行为, 其动机是为提高车速或超过慢车。这一步的换车道模型同样采用 PLC 法作为换车道需求产生的算法。

## 4. 2. 3 输出模块

### 1. 动态演示

动态演示可以使用户直观地感受到车辆在高速公路上行驶的动态行为, 一个良好的演示画面比单纯的数据输出更具有说服力, 并且加深对数据的理解。

### 2. 输出指标

高速公路评价指标输出将仿真模块所计算出的各车道的交通量、主线交通流平均速度、匝道口加、减速路段车辆换车道位置百分比、收费站平均排队延误、总排队延误、服务水平等评价指标通过输出对话框以数据的形式显示出来。一些重要指标的计算公式如下。

#### 1) 交通量

单位时间内记录出现在屏幕上各条车道上的车辆数  $Q$ 。

#### 2) 区间平均车速

在仿真区间上, 记录每一通过车辆的行程车速  $V_i$ 。行程车速又称区间车速, 是车辆行驶路程与通过该路程所需的总时间 (包括停车时间) 之比。

则区间平均车速采用下式计算:

$$\bar{V}_s = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i}} = \frac{ns}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (4-14)$$

式中  $\bar{V}_s$ —区间平均车速 (m/s)

$s$ —路段长度 (m)

$t_i$  — 第  $i$  辆车的行驶时间 (s)

$n$  — 车辆行驶于路段长度  $s$  的次数

$V_i$  — 第  $i$  辆车行驶速度 (m/s)

### 3) 车流密度

在某一瞬时内单位长度一条车道上的车辆数称为车流密度  $K$ 。

$$K = \frac{Q}{\bar{V}_s} \quad (4-15)$$

式中  $Q$  — 单车道上交通量 (辆/h)

$\bar{V}_s$  — 区间平均车速

### 4) 收费站平均延误

通过收费站的平均延误的计算公式如式(4-16):

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( T_i - \frac{2L}{V_{i1} + V_{i2}} \right) \quad (4-16)$$

其中

$D$  — 通过收费站的平均延误;

$n$  — 仿真时间内通过收费站系统的车辆总数;

$T_i$  — 第  $i$  辆车通过收费站的实际旅行时间;

$L$  — 收费站系统的总长度;

$V_{i1}$  — 车辆进入收费站系统的速度;

$V_{i2}$  — 车辆驶出收费站系统的速度;

## 4. 3 仿真系统的数据结构

高速公路交通流仿真程序使用 Visual C++ 编程语言进行设计, VC 采用了面向对象的程序设计思想和把数据及对数据的操作封装在一起形成类、对象和方法的机制, 并通过派生、继承、重载等特性实现软件重用和程序自动生成。VC 编程环境由可视化工作平台 (VisualWorkbench)、框架文件编辑器 (AppWizard)、资源编辑器 (AppStudio)、类编辑器 (ClassWizard)、MFC 类库五部分组成。

利用 VC++ 所提供的 MFC 应用程序框架来进行程序编写的关键是类, 仿真程序的编程使用了 VC 程序框架自动生成功能, 生成了支撑程序的四个基本类: 视图类 CHighwayView、文档类 CHighwayDoc、框架类 CMainFrame、程序类 CHighwayApp。本文随后又创建了十一个类: 车辆类 CVehicle、车辆生成类 CVehicleCreation、车辆运行类 CRun、车辆分布类 CDistribution、车辆行驶轨迹类 CTrack、匝道类 CRamp、仿真参数对话框类 DATAEXCHANGE、主线交通组成对话框类 FreewayDialog、收费站服务参数对话框类 PlazaService 和输出结果对话框类 CResultDlg、输出指标类 CMoE。各类之间的数据关系下图所示。

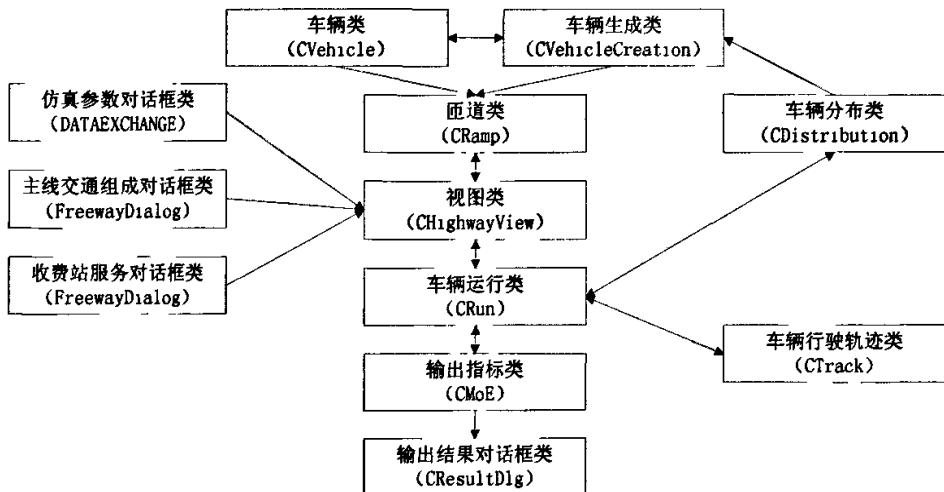


图 4-4 仿真程序各类之间的数据关系

现将关键类的主要成员变量和成员函数叙述如下：

#### (1) 车辆类 (CVehicle)

车辆类包含了某辆车所有特征信息的一组数据，如车长、车宽、速度、加速度、坐标位置等。车辆类的每一个对象就是一个实例车辆，车辆类的所有对象就构成了一个车辆链表。

车辆类的主要成员变量有：

- double m\_Length, m\_Width; // 车辆的长度和宽度
- int type; // 车辆类型
- double m\_V, m\_A, m\_BeforeV, m\_BeforeA; // 车辆本时刻的速度，加速度；车辆前一时刻的速度、加速度
- double m\_X, m\_Y, m\_BeforeX, m\_BeforeY; // 车辆本时刻的坐标；车辆前一时刻的坐标
- double m\_IntervalS; // 车辆在每一时间步长所行驶的距离
- double m\_Angle; // 车辆轴线与X轴夹角的弧度值
- int m\_Lane; // 车辆所属车道
- bool m\_OutRamp; // 是否在出口匝道驶出
- bool m\_Head; // 是否为头车
- bool m\_Tolling; // 是否正在交费
- double m\_TotalTime; // 车辆在画面中行驶的总时间

车辆类的主要成员函数为 DrawVehicle(CDC \*pDC)，负责在仿真时钟更新时，将车辆画到屏幕上。

#### (2) 匝道类 (CRamp)

匝道类包含了车辆在入口匝道和出口匝道的一些交通行为。主要成员变量有：

- bool m\_Accelerate; // 是否进入加速车道
- bool m\_FindGap; // 是否发现合适间隙
- bool m\_ChangeLane; // 是否正在变换车道汇入主线或驶离主线
- bool m\_ChangeFinish; // 是否已经完成汇入或分流

#### (3) 分布类 (CDistribution)

分布类包含了本仿真程序需要用到的几个分布，分布类的主要成员函数有：

- double Random(); 生成 0~1 之间的随机数。

- `double Seed()`: 生成随机数种子。
- `double UniformRandomVar()`: 生成服从均匀分布的随机变量。
- `double PossionRandomVar()`: 生成服从泊松分布的随机变量。
- `double NormalRandomVar()`: 生成服从正态分布的随机变量。

#### (4) 发车类 (CVehicleCreation)

发车类用于创建新车并初始化车辆的所有属性，包括车辆的车型、到达速度、初始车道、最大加速度、最大减速度等，在赋完车辆的所有属性后，将车辆加入链表的尾部。发车类的主要成员函数有：

- `void AssignRandom()`: 赋随机数函数。根据调用 CDistribution 类的分布函数生成随机数赋给当前车辆。
- `void AssignType()`: 赋车辆类型函数。根据所给出的车辆比例决定生成车辆的车型。
- `void AssignLength()`: 赋车辆长度函数。根据车辆的车型决定车辆的长度。
- `void AssignWidth()`: 赋车辆宽度函数。根据车辆的车型决定车辆的宽度。
- `void AssignApprochV()`: 赋车辆速度函数。根据车辆的车型和到达速度的分布赋予车辆的到达速度。
- `void AssignMaxA()`: 赋车辆最大加速度函数。根据车辆的车型赋予车辆的最大加速度和最大减速度。
- `void AssignLane()`: 赋车辆初始车道。

#### (5) 车辆运行类 (CPlazaRun)

车辆运行类用于处理车辆在高速公路基本路段行驶的运行特征，包括寻找前车、跟车、换车道等行为的处理。车辆运行类的主要成员函数有：

- `void RunMain()`: 车辆运行主函数。
- `CVehicle* FindLeadVeh(POSITION)`: 寻找前车函数。
- `void LeadOrNot(POSITION)`: 判断该车是否为头车函数。
- `void FollowVeh(POSITION)`: 跟车函数。
- `void ChangeLane(POSITION)`: 换车道函数。
- `void AvoidCollide()`: 防冲突函数。

#### (6) 输出指标类 (CMoE)

输出指标类用于计算交通流的效率指标。输出指标类的主要成员函数有：

- `void AveSpeed()`: 计算交通流平均车速函数。
- `void TotalQ()`: 计算总的通过交通量函数。
- `void AveDensity()`: 计算车流平均密度。
- `void AveRampSpeed()`: 计算匝道上车流的平均速度。
- `void AvePlazaServTime()`: 计算收费站平均服务时间。

## 4. 4 仿真程序界面

仿真开始前需要首先输入交通参数，通过“仿真”菜单下的“交通参数”可以设定。

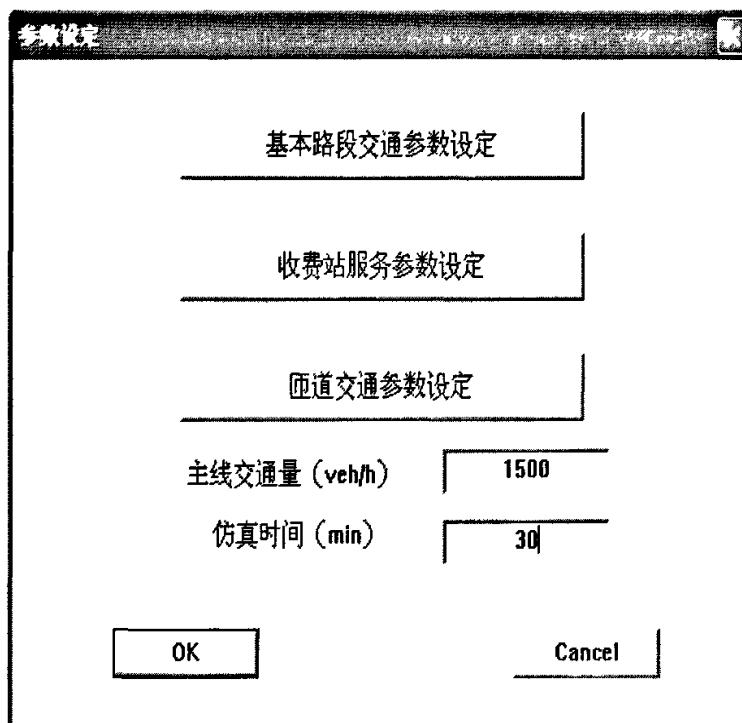


图 4-5 参数设置对话框

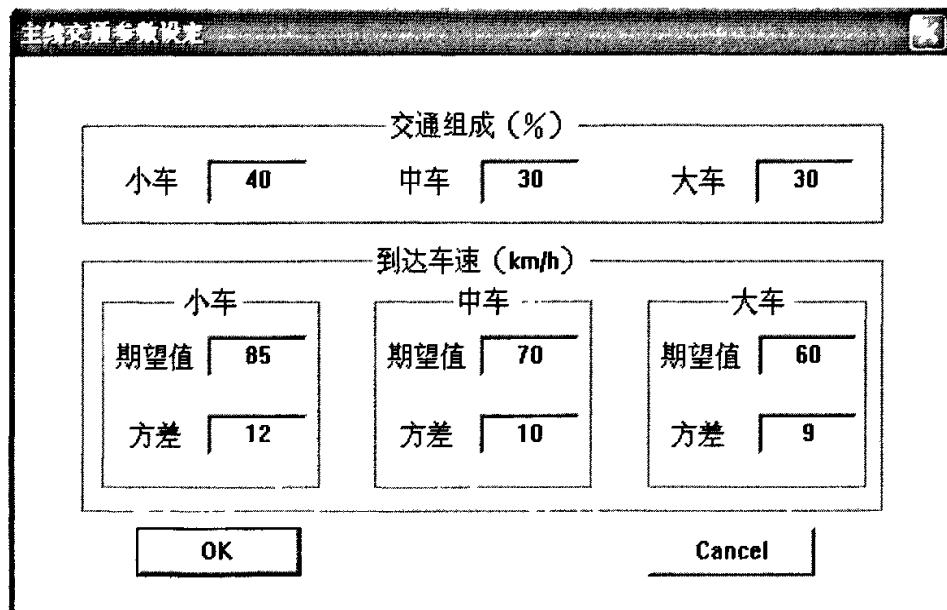


图 4-6 主线交通参数设定

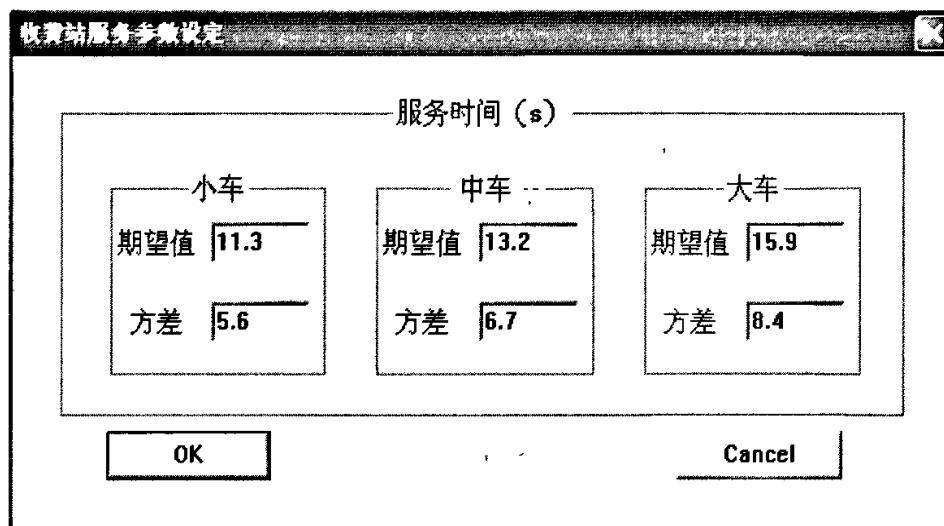


图 4-7 收费站服务时间设定

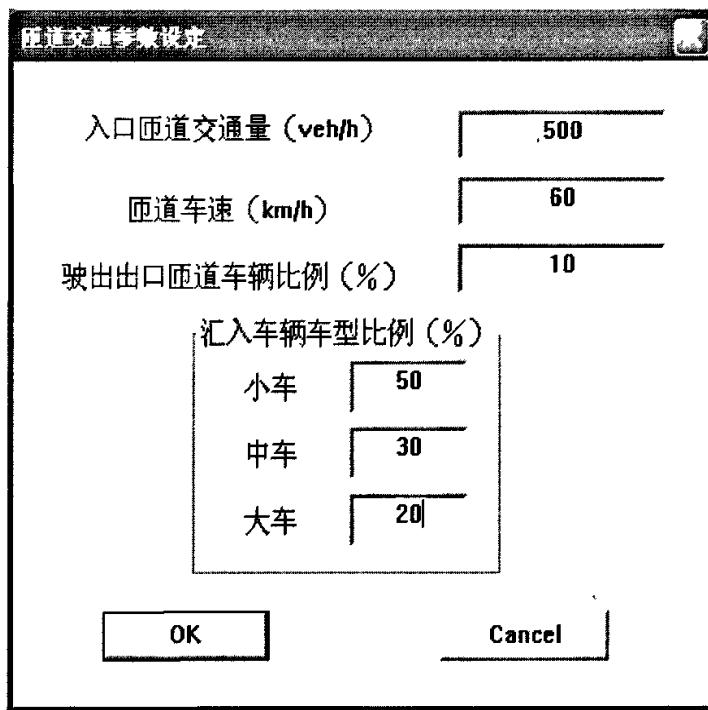


图 4-8 匝道交通参数设定

# 第五章 仿真应用研究

通过对交通仿真模型的分析、评价以及改进，设计开发了仿真程序系统，通过开发的交通仿真程序，可以对高速公路主线交通、匝道交通、收费站三部分进行交通仿真实验，作为分析其交通流运行特性的工具。由于时间的关系，本文仅对高速公路匝道合流区汇入车辆对主线交通的影响进行了较深入的研究；而对于高速公路基本路段、收费站这两部分，仅仅是对高速公路主线通行能力、收费站通行能力的仿真进行了一定的探讨。

## 5. 1 匝道汇入车流对主线交通的影响研究

在高速公路匝道合流区内，随着交通量的增大，由于车辆间的合流行为，往往会引起主线交通流紊乱，行车速度降低，延误增大，或因匝道车辆强行汇入而引发交通事故，形成高速公路的“瓶颈”路段。故对合流区进行影响分析是很有意义的。

### 5. 1. 1 仿真方案设计

高速公路入口匝道处的交通状况是整个高速公路系统中最为复杂、紊乱的一个部分。入口匝道的合流车辆要进入高速公路，先要进入加速车道行驶，同时寻找高速公路最外侧车道中车流可插入间隙，并调整加速度大小。当出现可插入间隙，合流车实施换车道操作，进入高速公路最外侧车道，合流车辆与高速公路主线车辆在匝道连接点附近争夺交通需求空间。

由于主线车流与匝道内车流在这个区域合流，必然会造成改区域车流量增加，当车流量很大时，会产生拥挤甚至阻塞，因此合流区可能会是高速公路的瓶颈区域。合流车辆直接汇入最外侧车道，对最外侧车道车流影响最大，但这种影响会涉及到整个路段所有车道的车流分布。其特征表现为靠近外侧车道上的车辆为避免与合流车辆产生空间冲突，会尽量向内侧车道换位，同时造成与内侧车流争夺空间。这将使内侧车道的车流量增加，导致车速降低，内侧车辆驾驶的舒适程度和安全性也会降低。因此改善合流区的车流情况可以提高高速公路主线的通行能力。

本文的交通仿真应用方案就是针对高速公路合流区合流车辆对主线交通的影响而设计的。方案分为两个实验，实验 1 是仿真高速公路主线交通，实验 2 在实验 1 的基础上加入汇入车辆，然后将两实验的数据进行比较分析。

实验 1：建立一段长度为 1000m 的单向双车道高速公路。为了方便研究，交通组成为 100% 的小型车，车辆均长度为 5m，最大加速度为  $3.0 \text{ m/s}^2$ ，最大减速度为  $10.0 \text{ m/s}^2$ 。内、外测车道交通量比例为 1: 1，主线自由流速度为 100km/h，然后设计主线交通量分别为 500、1000、1500、2000、2500、3000、3500、4000、4500veh/h，一共 9 级交通量，分别进行 1 个小时的仿真，以 6 分钟作为统计间隔，分别计算出内外测车道上仿真数据表现的速度、密度、流量，绘制流量—速度、密度—流量、密度—速度之间的关系图。

实验 2：在实验 1 所建的高速公路基本路段基础上，在 400m 处设立一单车道入口匝道，

渐变段长度 100m, 加速车道长度 200m。匝道的交通组成也为 100%的小型车, 车辆属性相同, 车长均为 5m, 自由流车速 60km/h, 最大加、减速度分别设定为  $3.0\text{m/s}^2$  和  $10.0\text{m/s}^2$ 。匝道交通量分别设定为 400、500、600veh/h, 主线交通量仍然分别设置为 500、1000、1500、2000、2500、3000、3500、4000、4500veh/h, 一共 9 级交通量, 每次进行一个小时的仿真, 以 6 分钟为统计间隔, 分别计算出内、外侧车道上仿真数据表现的速度、密度、流量, 绘制流量—速度、密度—流量、密度—速度之间的关系图。

## 5. 1. 2 仿真结果分析

图 5-1 至 5-6 分别为实验 1 中仿真输出数据描绘的内侧车道流量—速度、密度—流量、密度—速度关系曲线图和外侧车道流量—速度、密度—流量、密度—速度关系曲线图。下面是对实验 1 产生的数据进行的分析。

观察图 5-1、5-4 流量—速度图, 我们可以发现在前 3 级交通量 (单车道上流量分别为 250、500、750veh/h) 水平下, 主线上无论是内侧还是外侧车道的车辆都可以保持在自由流行驶状态, 车辆平均车速都在 100km/h 左右。当流量达到 1000veh/h 时, 车速开始下降, 但保持在 80km/h 以上; 达到 1500veh/h 的时候, 车速降至 80km/h 以下; 达到 2000veh/h 时, 数据比较密集, 因为此时交通流已经非常拥挤, 已趋于最大流量, 车速保持在 60km/h 左右。

密度—流量图 5-2、5-5 都呈直线型变化, 流量随着密度的增大都增加; 最后一段增加幅度有所平缓。

密度—速度图 5-3、5-6 呈下降趋势, 密度越大速度越低, 但也可以清晰的发现, 在前 3 级交通量状态下, 密度增大, 而速度缺变化不大。

比较内侧车道与外侧车道的流量—速度、密度—流量、密度—速度关系图, 发现两者趋势一致, 且差别不大, 这是因为实验假设内外车道上的交通流量相同。

图 5-7 至图 5-12 为实验 2 中仿真输出数据描绘的内侧车道在不同的匝道交通状况下产生的流量—速度、密度—流量、密度—速度关系曲线图和外侧车道在不同的匝道交通状况下产生的流量—速度、密度—流量、密度—速度关系曲线图。以下是对实验 2 产生的数据进行的分析。

图 5-7 展示了匝道车流量分别为 400、500、600veh/h 的情况下, 主线内侧车道的流量—速度关系图。从图中可以看出, 由于匝道汇入车流的影响, 在车流量 500veh/h 时, 车速就无法保持自由流车速而开始下降, 这说明内侧车道上的车辆受到了汇入车辆的影响; 并且汇入车辆越多, 影响越大。内侧车道上的最大交通辆也受到影响而变小。

对比实验 1 中内侧车道的流量—密度图, 发现虽然受到汇入车辆影响后速度、流量都有所下降, 但图形整体趋势一致, 说明影响较小。

图 5-8、5-9 与图 5-2、5-3 整体趋势也大体相同。

图 5-10 展示了匝道车流量分别为 400、500、600veh/h 的情况下, 主线外侧车道的流量—速度关系图。图中数据点相当分散, 在同一交通流量下, 车速分布大, 表明主线外侧车道上行驶的车辆时常受到汇入车流的干扰, 而无法保持一个均衡的速度前进, 时常需要减速行驶。当主线车流量级数为 4000veh/h 时, 仿真的外侧车道已经阻塞。与实验 1 结果图 5-4 相比较, 相差很大。说明汇入车流对外侧车道上行驶的车辆影响很大。

图 5-11、5-12 分别为不同匝道流量下主线外侧车道的密度—流量图、密度—速度图, 数据点也非常分散但整体趋势上, 还是与图 5-5、5-6 有些相似。

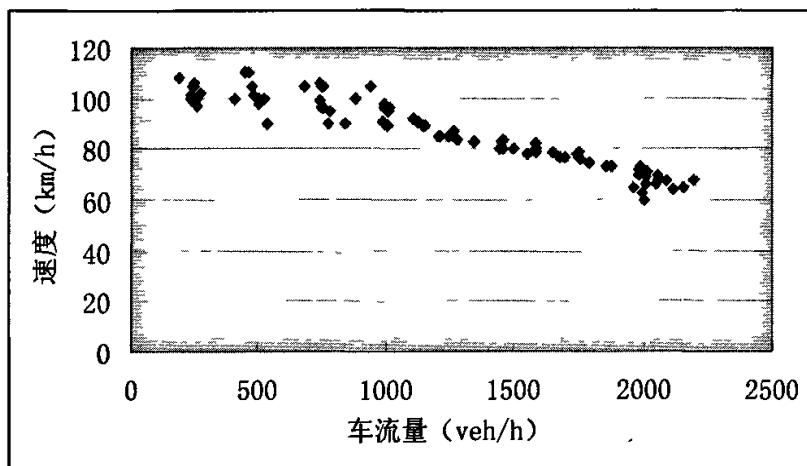


图 5-1 实验 1—内侧车道流量—速度图

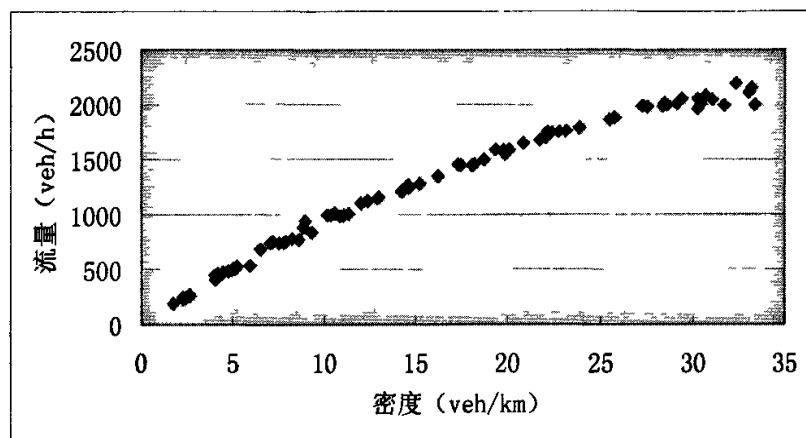


图 5-2 实验 1—中内侧车道密度—流量图

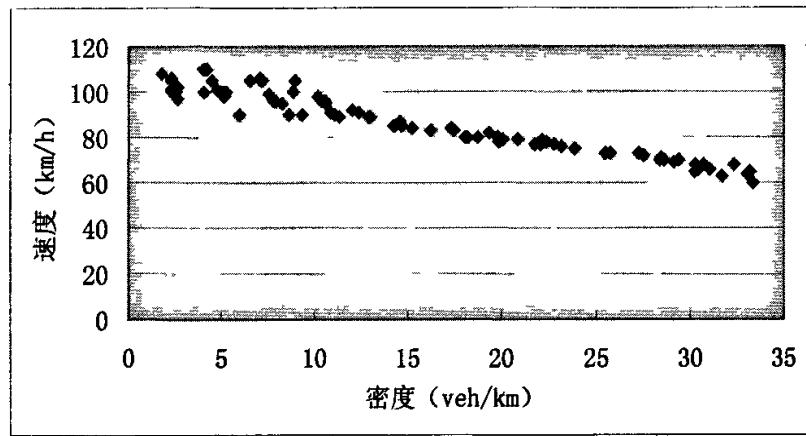


图 5-3 实验 1—内侧车道密度—速度图

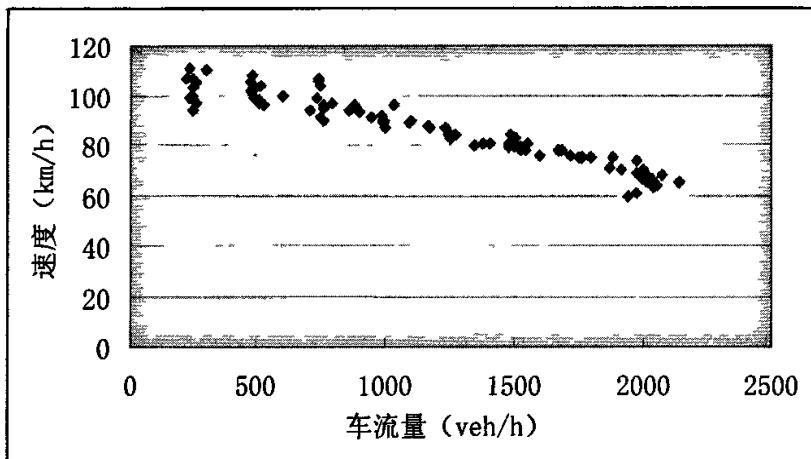


图 5-4 实验 1—外侧车道流量—速度图

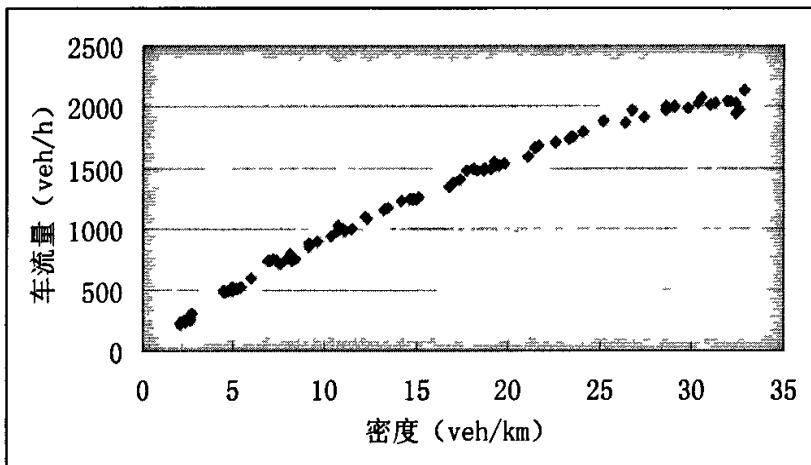


图 5-5 实验 1—外侧车道密度—流量图

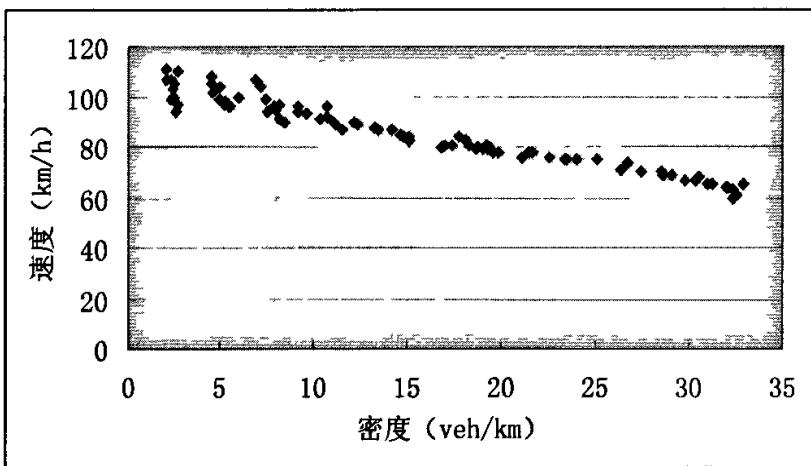


图 5-6 实验 1—外侧车道密度—速度图

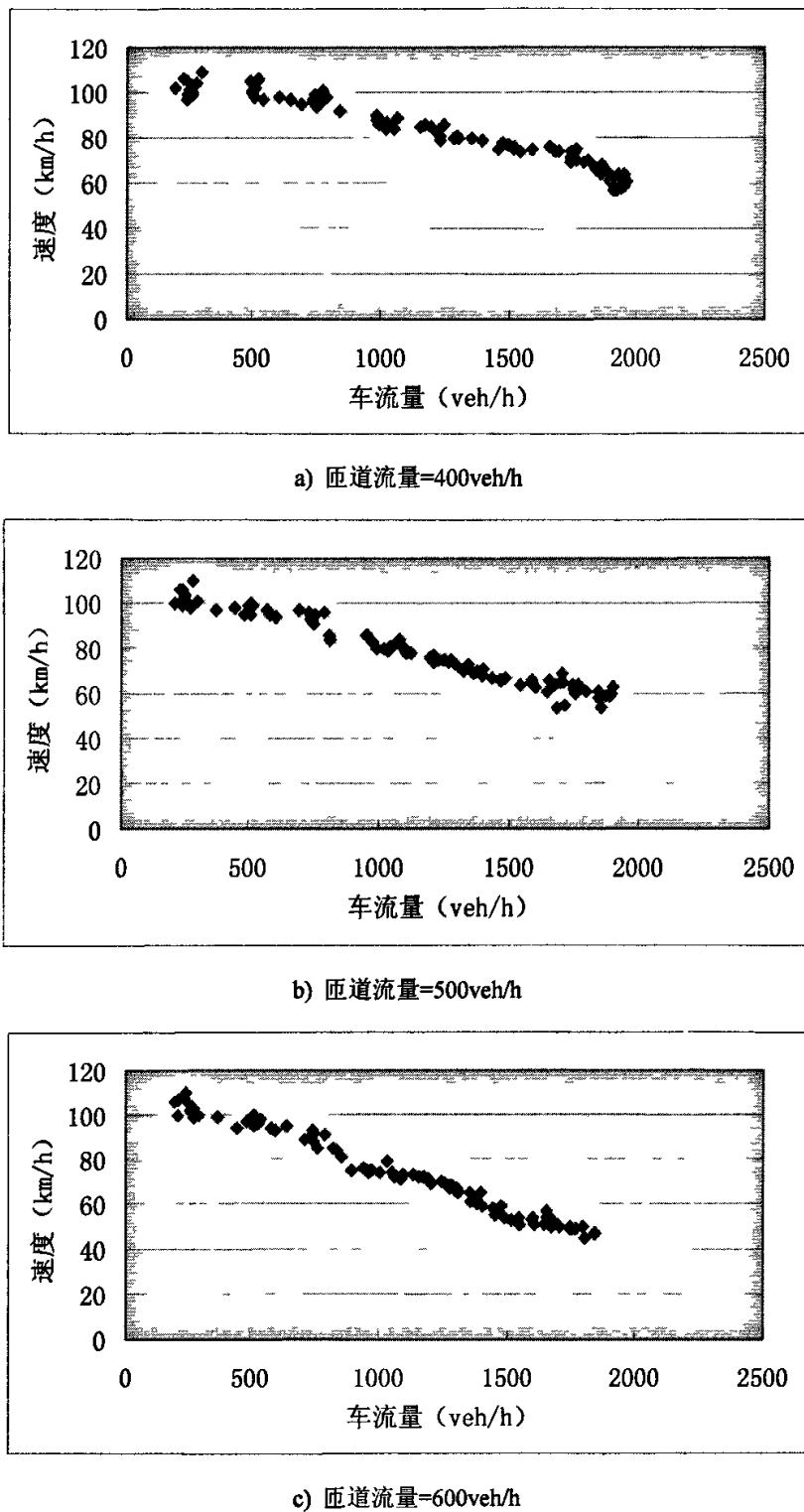


图 5-7 实验 2—主线内侧车道流量—速度图

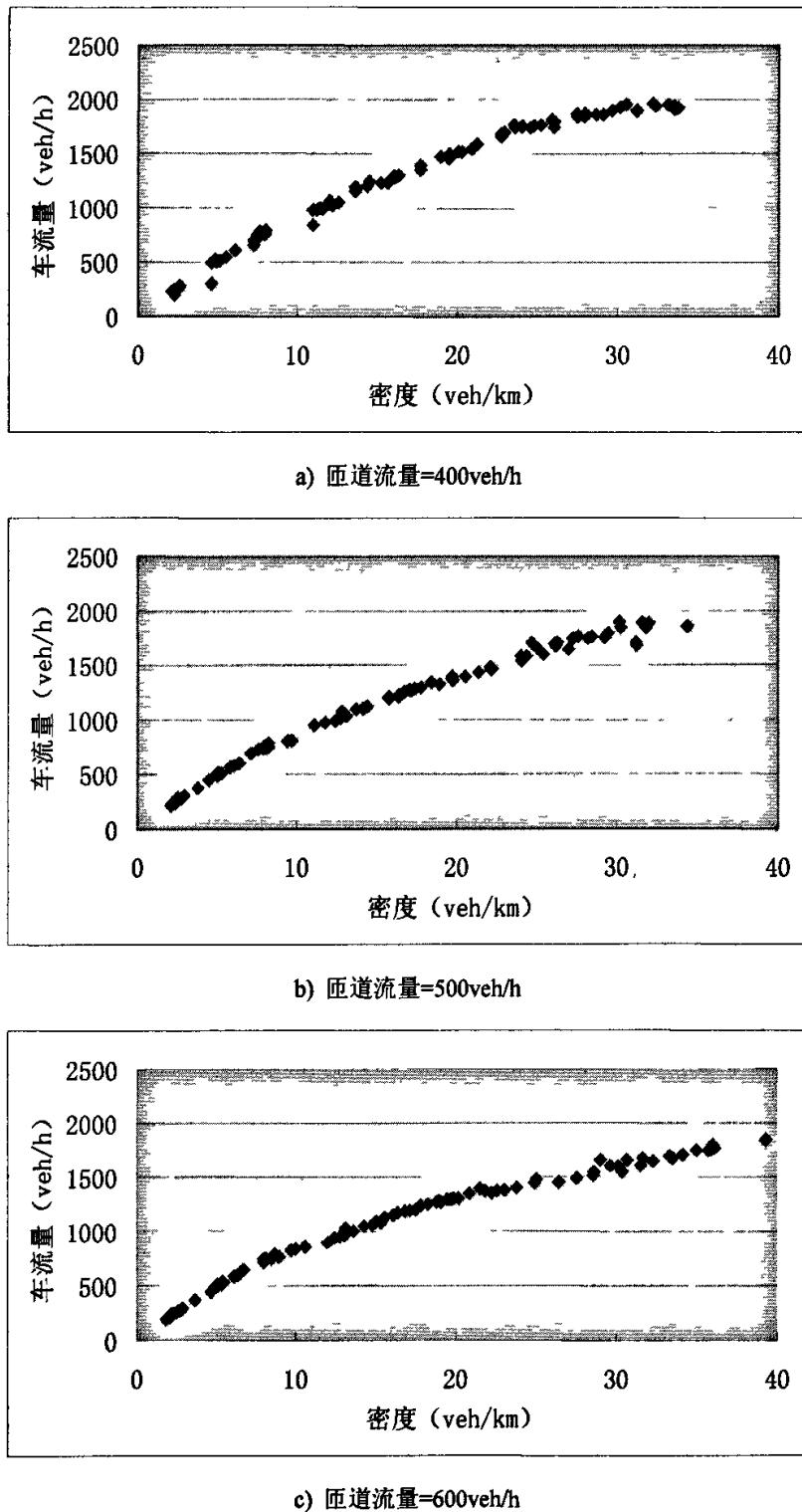


图 5-8 实验 2—主线内侧车道密度—流量图

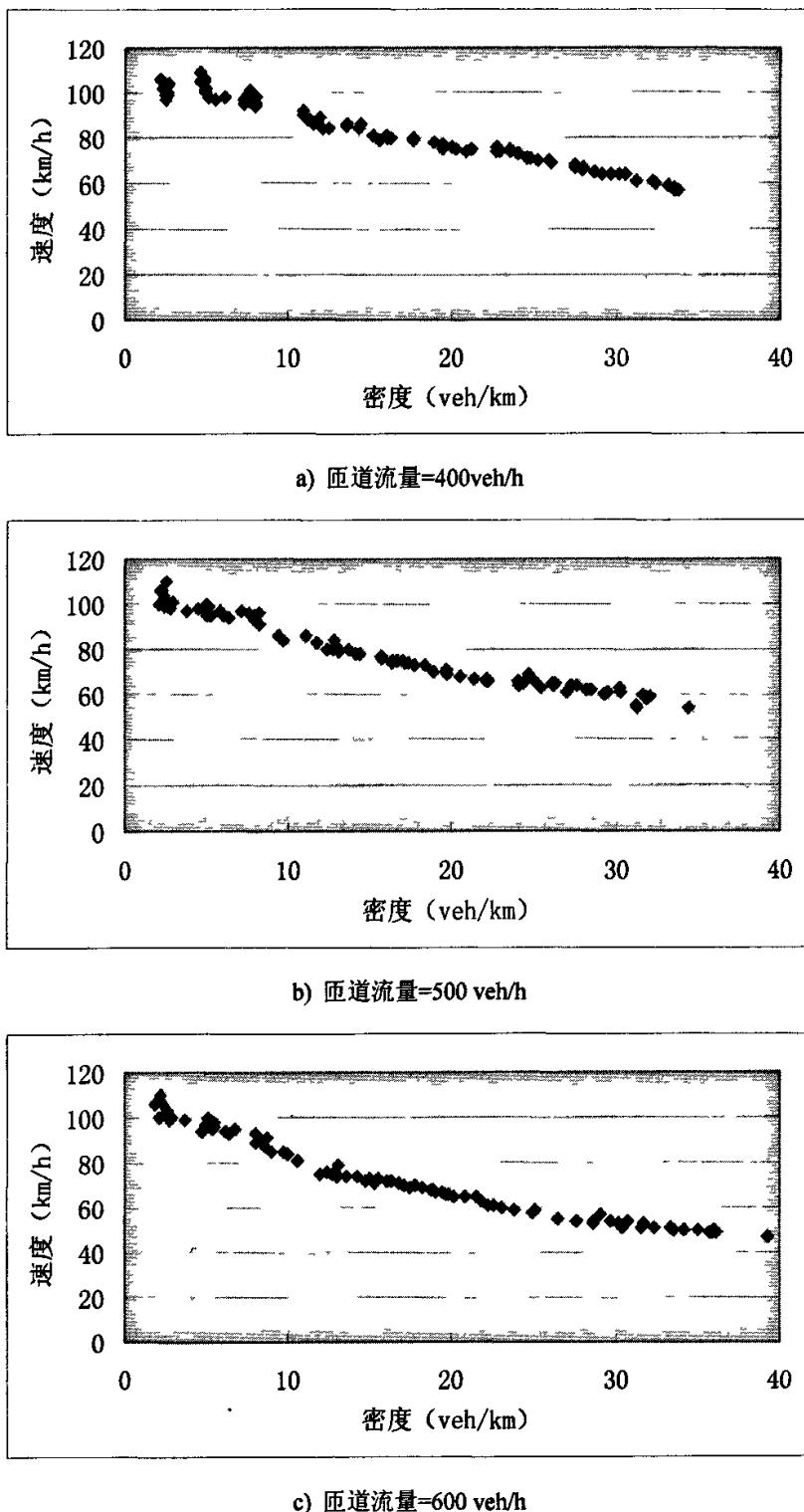


图 5-9 实验 2—主线内侧车道密度—速度图

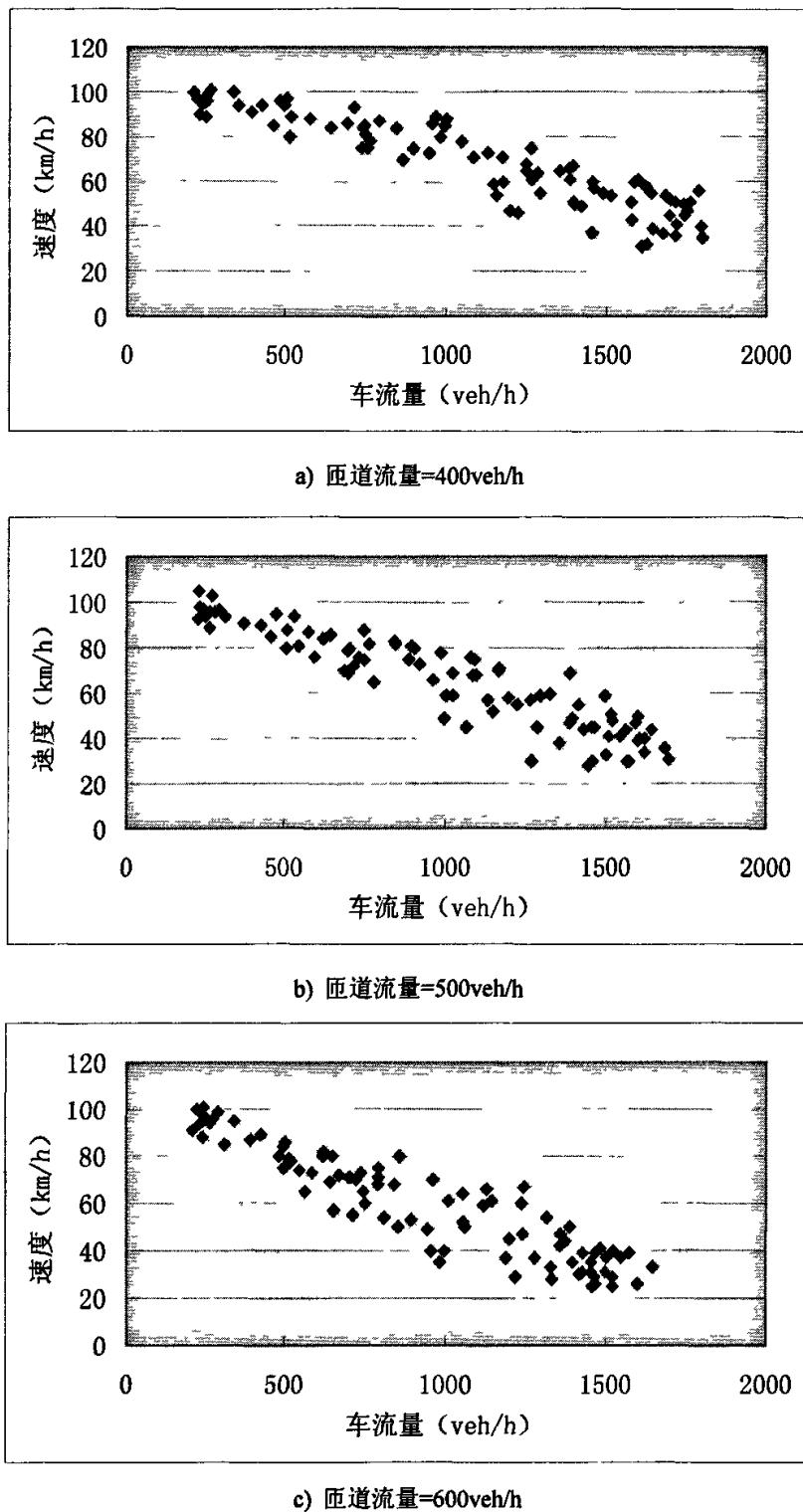


图 5-10 实验 2—主线外侧车道流量—速度图

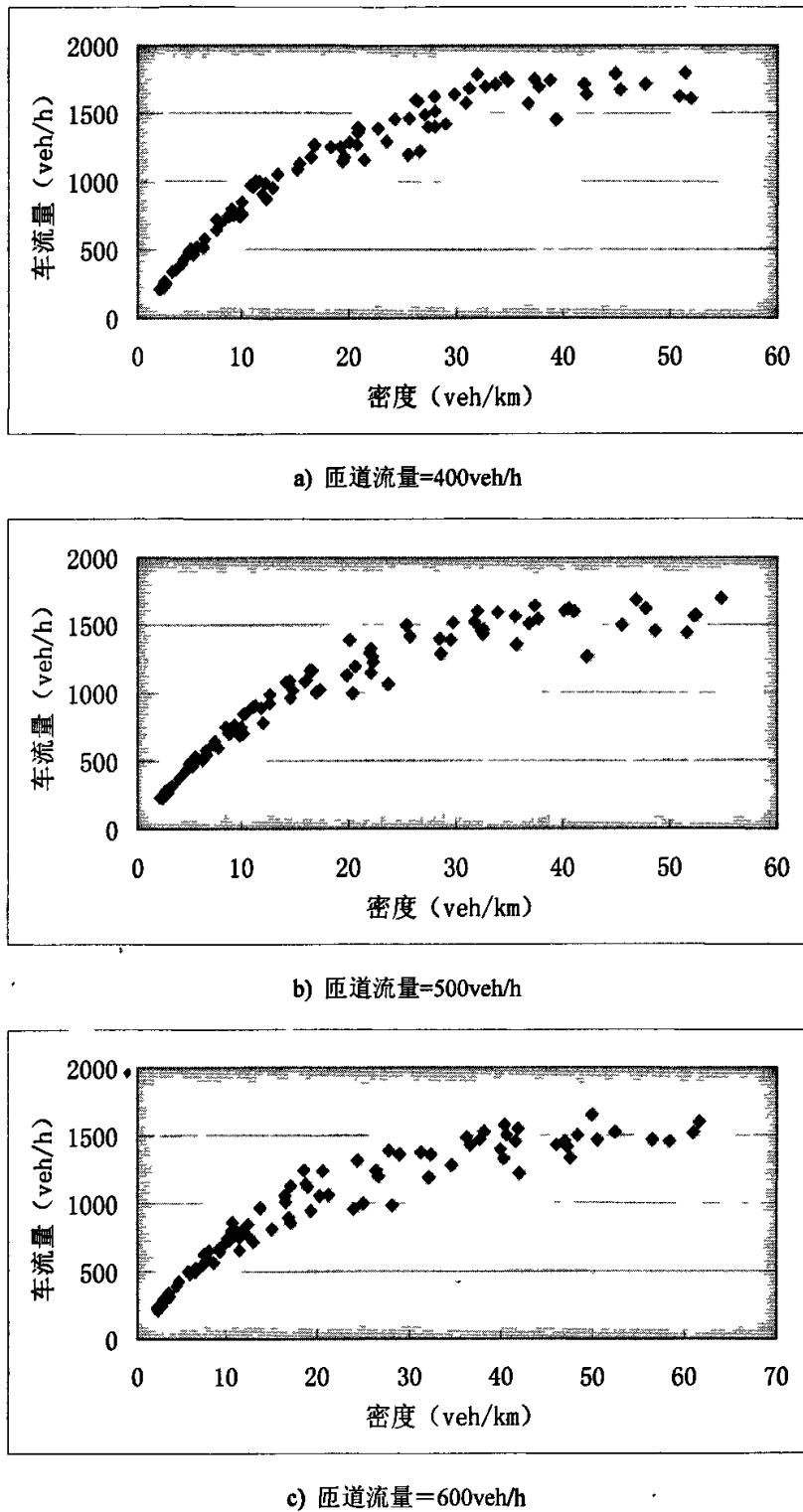


图 5-11 实验 2—主线外侧车道密度—流量图

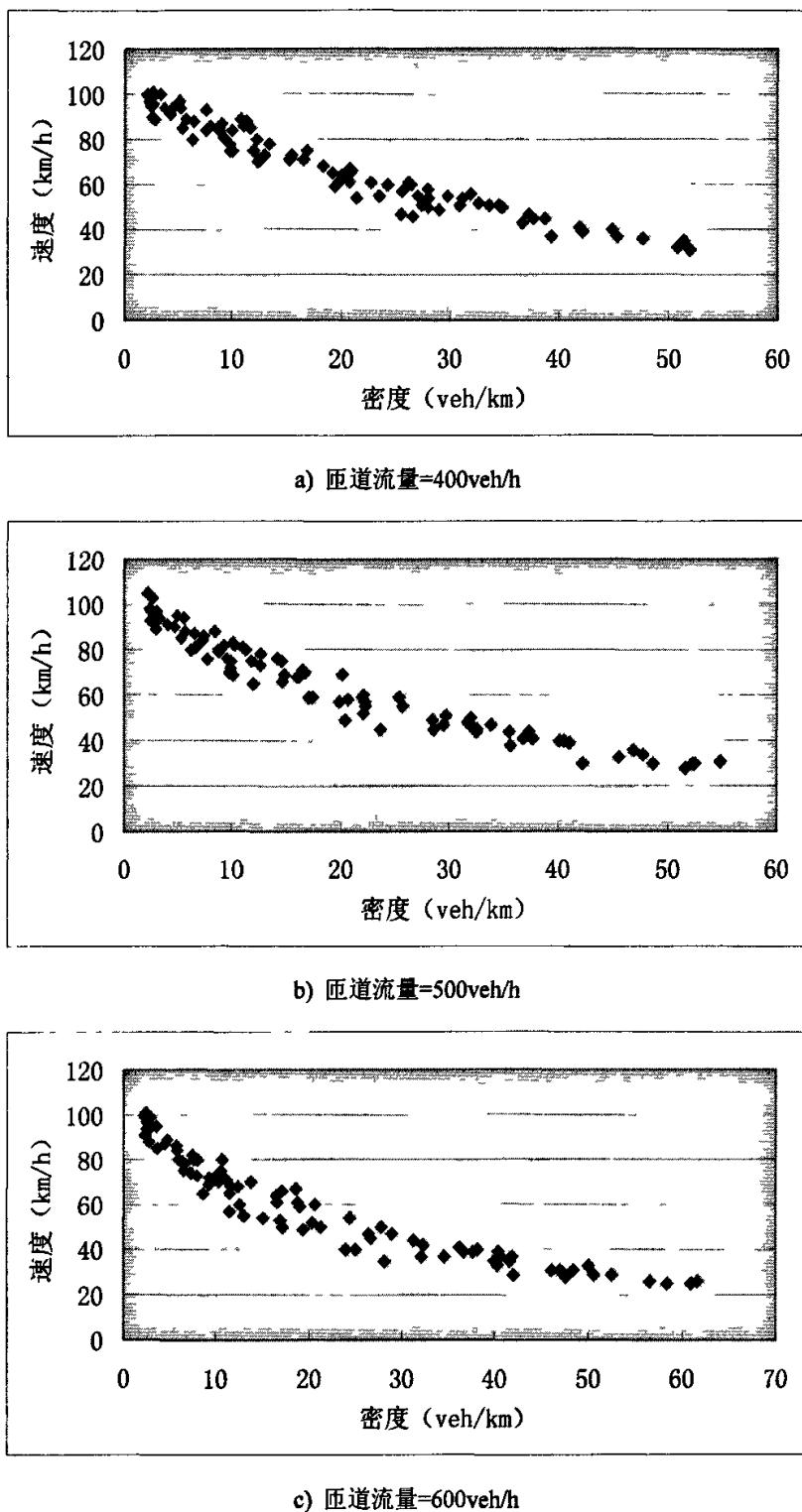


图 5-12 实验 2—主线外侧车道密度—速度图

## 5. 2 主线道路施工的影响

高速公路由于受建设管理水平的限制、或由于车辆超重、天气恶劣等原因，道路路基、路面容易损坏，对车辆的正常通行、安全、舒适都造成了很大的影响，往往需要进行施工补救，而施工就意味着高速公路某条车道的封闭，形成高速公路瓶颈，降低道路通行能力。另一种情况是由于早期建立的高速公路（我国通常是双向四车道）已不能满足目前的交通流量水平，需要进行施工改建扩建。通过高速公路交通仿真，可以对这两种情况进行分析。

对于道路施工维修，可以假设主线上外侧车道某一段车辆禁止通行，即这条车道上的车辆到达该点时必须变换车道，和入口匝道车流的换车道行为一样，通过仿真，可以得出施工时该条道路的实际通行能力，分析其对交通影响的大小。

对于道路施工扩建，可以在一定的交通流量水平下，对于原始道路和拟扩建道路进行仿真，如原来为双向四车道高速公路，拟扩建为双向六车道或双向八车道高速公路，对其进行分别进行仿真，计算得出高速公路通行的评价指标，如：交通流、车流平均速度等。为高速公路的扩建提供一定的参考。

## 5. 3 收费站通行能力分析

目前我国收费站设计中采用的收费车道通行能力指标基本上是沿用国外的研究成果，而我国高速公路收费站的收费方式以及司机的交费方式与国外相比存在较大的差异，现有的收费车道的通行能力指标不能反映我国的高速公路收费站的实际情况。我国关于收费站通行能力的研究尚处于起步阶段。面对我国利用收费还贷方式大规模建设高等级公路设施的现状，确定适合我国实际情况的收费站通行能力指标体系具有十分重要的现实意义。

本文认为车辆在收费广场的运行分为三个步骤：首先是车辆减速进入收费广场，选择排队长度最短的收费车道准备进入队列；其次是车辆从开始排队开始，一直到开始接受服务，完成服务，准备驶离收费站；最后是车辆已完成交费后，加速驶离收费广场，选择邻近的或空闲的道路重新进入高速公路基本路段。

如果仅仅考虑人工收费或半自动收费方式，车辆在收费站的行车时间主要考虑的是收费站的服务时间问题。采用交通仿真方法可以对人工收费、半自动收费两种情况分别进行仿真模拟；或者通过设定不同的服务时间，来分析收费站的服务制式是否为高速公路收费站通行能力的主要影响因素。

# 第六章 结论与展望

## 6. 1 本文的主要研究工作

1. 分析了高速公路系统中基本路段、匝道、收费站三个部分的交通流特性；
2. 分析评述了国内外高速公路系统仿真模型的研究成果，为仿真程序各模块中模型的选择提供依据；
3. 设计开发了高速公路交通流仿真程序，程序可以分别对高速公路基本路段、匝道（包括入口匝道、出口匝道）、收费站的交通流进行仿真；实现二维动态模拟，直观反应车流在高速公路各部分的行驶行为；可以输入不同的仿真参数，来对比不同交通流情况下高速公路通行能力、服务水平的变化；仿真完成后，能够输出各车道的小时交通流、模拟路段上车流平均速度等高速公路评价指标；
4. 设计仿真程序应用方案，通过所开发的仿真程序，对高速公路合流区进行交通仿真，分析研究了汇入车辆对主线交通的影响，并对高速公路主线通行能力和收费站通行能力的仿真应用做了一定的探讨。

## 6. 2 研究展望

由于时间和实验设备的限制，本研究在某些方面还不是很完善，需要进一步探讨：

1. 本文对国内外的交通仿真模型进行了详细的论述和评价，仿真程序是在此基础上开发设计的。但鉴于不同高速公路的交通状况有很大区别，仿真模型中的参数却是大不相同的，需要实地采集交通流数据才能准确的设定仿真模型的各个参数，建立最适合该高速公路的仿真模型。
2. 本仿真程序对高速公路基本路段、匝道、收费站都进行了仿真，各部分模型仍然可以继续细化、完善。如在高速公路基本路段可以考虑平、纵曲线的影响、驾驶员驾驶倾向的影响，匝道口分析加减速车道长度的设置等，更准确的模拟高速公路上车辆的行为。
3. 本文的仿真应用研究对各部分如何应用进行了介绍，但由于时间限制，仅对高速公路合流车辆对主线交通的影响进行了仿真实验，在以后的研究中可以对主线、收费站服务等方面做进一步的仿真应用研究探讨。

## 致 谢

本文是在我的导师路小波的悉心指导和关怀下完成的，从论文的开题到完成，其中每一步都凝聚了导师的心血。由于路老师的鼓励和指导，我才能将论文不断深化、充实和完善。路老师严谨的治学态度、渊博的知识和求实的工作作风给我以极大的教育，使我受益终生。在此向我的导师表示衷心的感谢并致以崇高的谢意！

论文工作期间，研究中心的钱振东老师、柴干老师、张晓春老师、刘斌老师、陆振波老师、何铁军老师、高朝晖老师和张宁老师也曾给予我许多鼓励、支持和建议，谨向他们表示最真挚的谢意。

在课题研究和论文撰写过程中，本实验室的丁昌华、卓曦、徐琳等同学，宿舍室友张利学、刘光明、张发才同学都给予了我大力支持与热情帮助，在此向他们表示深深的谢意。

最后，向一贯支持我学业的父母和我的女友张溧栗表示深深的谢意，他们在生活上、精神上给予我的支持和激励始终是我前进的坚强动力。

朱凌  
2006年1月  
于东南大学ITS研究中心

# 研究生在学期间公开发表的学术论文

- [1]. 朱凌, 路小波. ETC 技术在智能停车场管理中的应用研究. 交通科技, 2005 (5): 94-96

## 参考文献

- [1] Yuhao Wang, Panos D. Prevedouros. Synopsis of Traffic Simulation Models. <http://www.eng.Hawaii.edu>
- [2] K. Rathi, Z. A. Nemeth. FREESIM: A Microscopic Simulation Model of Freeway Lane Closures[J]. Transportation Research Record. 1986, TRB, 1112
- [3] Fazio. J and Roushail. N. Conflict Simulation in INTRAS: Application to Weaving Area Capacity Analysis[J]. Transportation Research Record No. 1287. Transportation Research Board, Washington, D. C., 1990
- [4] Halati. A and Torres. J. Freeway Simulation Model Enhancement and Integration FRESIM Calibration/Validation[J]. Federal Highway Administration Report. 1990, No. DTFH61-85-C-00094
- [5] Mechanical Simulation Corporation. 2002. 9, CarSim 5. 14 User Manual
- [6] Zarean. M and Nemeth Z. A. WEAVSIM: A Microscopic Simulation model of freeway weaving sections[J]. Transportation Research Record, 1194, 48-54
- [7] Yagar, S. Accommodating Transit in TRANSYT[C]. In Transportation Research Record 1181, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1988, 68-76
- [8] 荣建. 高速公路基本路段通行能力研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 1999
- [9] 陈建阳. 交通流微观模型与宏观模型的统一[J]. 同济大学学报, 1997, 25 (1)
- [10] 易涛, 熊坚, 万华森. 高速公路基本路段交通流微观仿真建模与实现[J]. 昆明理工大学学报, 2004, 29 (3): 94-97
- [11] 任福田、徐吉谦等. 交通工程导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- [12] 任福田等译. 道路通行能力手册(美国交通研究委员会专题报告 209 号) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- [13] 公安部令第 20 号. 1994. 12. 22. 高速公路管理办法[S]
- [14] Transportation Research Board[M]. Highway Capacity Manual. 2000, Washington D. C
- [15] 裴玉龙, 张亚平等. 道路交通系统仿真[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [16] 王炜, 过秀成等编著. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [17] 撒元功, 徐建闽, 贺敬凯. 高速公路动态交通流的模型与仿真研究[J]. 交通与计算机, 2002, 20 (3): 3-6
- [18] 任福田等. 交通工程心理学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1993
- [19] Verhoef E. An Integrated Dynamic Model of Road Traffic Congestion on Simple Car-following Theory[C]. Transportation Research Board 77<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington, D. C. 1998
- [20] Michaels. Perceptual factors in car following[C]. In the Proceedings of the second international symposium on the theory of road traffic flow. 1963, OECD, 44-59
- [21] Kometani E., Sasaki T. A Safety Index for Traffic with Linear Spacing[J]. Operations Research, 1959, 17 (6): 105-119
- [22] Gipps P. G. A Behavioral Car Following Model for Computer Simulation[J]. Transportation Research Record, 1981, 15 (3): 105-111
- [23] Kikuchi & Chakroborty. Car following model based on a fuzzy inference system[J]. Transportation Research Record, 1992, 13 (6): 82-91

- [24] Raymond G. M, M. Vermijs. The use of micro simulation for the design of weaving sections[J]. Highway Capacity and Level of Service. 1991, 5 (6): 111-117
- [25] Federal Highway Administration, CORSIM User's Manual Version 1. 04. 1998. 3
- [26] Q. Yang and H. N. Koutsopoulos. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems[J]. Transportation Research C, 1996, 4(3): 119-129
- [27] P. G. Gipps. A model for the structure of lane changing decisions[J]. Transportation Research, Vol. 1986, 20B(5): 4-14
- [28] K. Ahmed, M. Ben-Akiva, H. Koutsopoulos and R. Mishalani. Models for freeway lane changing and gap acceptance behavior[C]. In Proceedings of 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Lyon, France, 1996: 255-261
- [29] Hideki Nakamura, Masao Kuwahara, Masaki Koshi, A simulation model for the evaluation of weaving capacity[J]. Highway Capacity and Level of Service, 1991, 5 (6): 61-69
- [30] 姜紫峰, 荆便顺, 韩锡令. 高速公路入口匝道控制的仿真研究[J]. 中国公路学报, 1997, 10 (2): 83-89
- [31] 杜晓晖. 高速公路系统的仿真模型及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2003
- [32] Alexander Skabardonis. Simulation of Freeway Weaving Areas[C]. Transportation Research Board 81st Annual Meeting January 13-17, 2002. Washington, D. C.
- [33] 邹智军, 杨东援. 道路交通仿真研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2001, 6 (2): 88-91
- [34] 刘运通, 石建军, 熊辉编著. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [35] 王丽, 刘小明, 任福田等. 交通仿真在交通影响分析中的应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4 (3): 70-73
- [36] 裴玉龙. 道路通行能力[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996
- [37] 潘虹. 高速公路收费站 ETC 车道设置仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2005
- [38] 赵春. 高速公路合流区交通模拟与评价研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 1998
- [39] 孙俊, 商蕾, 高孝洪. 交通仿真模型及其应用研究[J]. 交通科技, 2004, 第 4 期: 102-104
- [40] 孙剑, 杨晓光. 微观交通仿真模型系统参数校正研究—以 VISSIM 的应用为例[J]. 交通与计算机, 2004, 22 (3): 3-6
- [41] 王青, 曲仕茹, 史忠科. 一种高速公路交通流密度模型及其应用[J]. 公路交通科技, 2002, 19 (2): 97-100
- [42] 周刚, 常成利. 高速公路收费站通行能力研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(3): 57-59
- [43] 郝记秀, 郑兆瑞. 基于面向对象的交通仿真研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 7 (4): 437-440