

北京市教育委员会科技发展计划项目

编号: 2002kj003

城市快速路跟驰理论研究 研究报告

研究单位: 北京工业大学交通研究中心

2005 年 3 月

摘 要

本报告以构造能够准确反映我国城市快速道路上实际交通流跟车特性的车辆跟驰模型为最终目标。车辆跟驰理论是指一条车道的交通流中,车间距小于 125 米的车辆之间存在着一种可以定量描述的相互影响关系,后车的司机跟随前车行进,凭借感知能力、判断能力和控制能力,对前车一系列连续的刺激有规律地做出反应。

车辆跟驰理论作为最基础的交通流理论分支,国外在这方面的研究已经持续了半个多世纪,尽管现有的许多跟车模型已经应用于实践,但由于每个模型都存在或多或少的不足,以及各地交通流特性的差异,导致目前尚未有被普遍接受的跟车模型。随着智能交通系统(ITS)正蓬勃展开,司机行为和车辆运行特征是构建智能交通系统的基础。本研究选择了具有重要政治经济意义、实践中普遍关注的高速公路和城市快速路作为研究对象,针对高速公路和快速路中的车辆跟驰理论展开研究。从微观角度研究司机、车辆在快速路中的行为特征。其成果将为防止车辆追尾事故、构建智能交通系统、实现交通仿真和估算通行能力提供理论基础。

本报告在认真分析国内外车辆跟驰理论领域研究的基础上,综合评述已有的成果,发现已有的研究缺乏描述跟车行为的时间序列数据,针对跟车模型存在的问题,选定研究的突破方向为:无人干扰的高精度车辆跟驰实测数据采集方法、在实测数据基础上,定性与定量相结合,确定快速路车辆行驶状态指标及其种类划分的方法、建立随机性与规律性相统一的车辆跟驰模型。确定了从“实际应用出发、依靠高新设备采集跟车数据,运用科学的理论方法,结合计算机仿真技术”的研究思路和技术路线。

本报告通过分析和试验建立了基于 GPS 的实时动态车辆跟驰数据采集方法,较好的解决跟车状态下司机行为和车辆运行特征的时间序列实测数据的采集问题。并据此制定了详尽的数据采集方案,采集了大量真实反映我国城市快速道路交通条件特性的车辆跟驰数据,经过数据的有效性检验,为真实反映我国城市快速道路交通条件特性的车辆跟驰模型的研究提供坚实的数据支持。

本报告从分析城市快速道路跟车行为入手,利用李雅普诺夫特征指数,定性与定量相结合,讨论了跟驰车队中的混沌特性。运用混沌动力学,构造了以时滞微分方程为基础的稳定跟车状态下的跟车模型。

本报告以平均加速度为指标,利用模糊聚类的方法,把城市快速道路交通流中的跟车行为划分为三种状态进行讨论,即启动加速跟车状态、稳定跟车状态、

减速停车跟车状态。利用在特定的交通条件和道路条件下获得的跟车数据,针对起动加速跟车状态和减速停车跟车状态,得到这两种状态司机反应时间的规律。分别分析了三种状态车头间距和车头时距的变化规律,利用人工神经网络得到了车头间距和车头时距与后车速度以及相对速度之间的跟车模型。验证了稳定跟车状态存在期望车头间距,实测数据显示,期望车头间距受车速的影响,并获得了特定交通条件和道路条件下不同速度所对应的期望车头间距。利用实测数据验证了稳定跟车状态存在的振荡过程。发现我国城市快速道路交通流中稳定跟车状态下,后车司机所采取的加速度与相对速度呈明显的线性正比例关系;与车头间距呈明显的非线性反比例关系。

研究根据加速度与相对速度、车头间距、期望车头间距之间的规律标定了城市快速道路的跟车模型。利用仿真试验对基于混沌动力学的跟车模型进行了定性验证,验证结果显示,该模型具有有效跟车模型应具备的渐进稳定性、非对称性、以及目标与偏移等特性。同时利用实测数据对该模型和 Greenshields 模型、Greenberg 模型进行了定量预测误差分析,分析结果显示基于混沌动力学的跟车模型有比较高的预测精度。最后利用该模型求解出更接近于实际的通行能力值。

关键词: 车头间距, 后车速度, 相对速度, 城市快速道路, 混沌动力学

目 录

第一章 概述	1
1.1 项目背景	1
1.1.1 车辆跟驰理论的定义	1
1.1.2 问题的提出	1
1.2 研究的意义及目的	3
1.3 研究内容	4
1.4 主要研究成果	5
第二章 跟车模型研究综述	6
2.1 跟车模型研究回顾	6
2.1.1 国外跟车模型研究回顾	6
2.1.2 国内跟车模型研究回顾	18
2.2 成果综述及突破点	21
2.2.1 成果综述	21
2.2.2 本研究的突破点	23
2.3 技术路线	24
2.4 小结	24
第三章 数据采集与处理	26
3.1 跟车数据采集方法	26
3.1.1 现有的跟车数据采集方法	26
3.1.2 用车载高精度 GPS 设备采集跟车数据	27
3.1.3 基础性试验	29
3.1.4 应用性试验	32
3.2 数据采集	36
3.2.1 调查目的	36
3.2.2 调查内容	36
3.2.3 调查地点的选择	36

3.2.4	调查仪器及人员	37
3.2.5	调查实施	37
3.3	调查数据的初步整理	38
3.3.1	GPS 数据的后差分处理	38
3.3.2	GPS 跟车数据的有效性处理	39
3.4	小结	39
第四章	基于混沌动力学跟车模型的构造	40
4.1	跟车行为中的混沌现象	40
4.2	定量分析跟车行为中的混沌现象	43
4.2.1	李雅普诺夫指数	43
4.2.2	跟驰车队混沌性的定量分析	44
4.3	基于混沌动力学跟车模型的建立	49
4.4	小结	50
第五章	城市快速道路跟车模型	51
5.1	跟车行为状态划分	51
5.1.1	确定跟车行为状态划分指标	51
5.1.2	跟车行为状态划分方法	56
5.1.3	模糊聚类分析方法	57
5.1.4	状态划分结果的验证	60
5.2	司机的反应时间	61
5.2.1	起动加速跟车状态的司机反应时间	63
5.2.2	减速停车跟车状态的司机反应时间	65
5.3	车头间距和车头时距	68
5.3.1	安全跟车间距	68
5.3.2	起动加速跟车状态下的车头间距	71
5.3.3	稳定跟车状态下的车头间距	74
5.3.4	减速停车跟车状态下的车头间距	78

5.4 加速度	80
5.4 城市快速道路跟车模型的标定	84
5.5 小结	88
第六章 模型验证	90
6.1 稳定性分析	90
6.2 非对称性分析	92
6.3 目标与偏移	94
6.4 误差分析	95
6.5 从跟车到宏观交通流模型	98
6.6 小结	98
第七章 结论及展望	100
7.1 研究的主要结论	100
7.2 研究的主要创新点	101
7.3 研究展望	101
附录 模拟程序 (GIS-Simu)	102
研究期间发表的论文	104
参考文献	105

第一章 概述

1.1 项目背景

1.1.1 车辆跟驰理论的定义

车辆跟驰理论是运用动力学方法,研究在无法超车的单一车道上,车辆列队行驶时,后车跟随前车行驶状态的一种理论,它用数学模式表达跟车过程中发生的各种状态^{[1][2]}。跟车理论试图通过观察各个车辆逐一跟驰的方式来了解单车道交通流的特性。这种特性的研究可以用来描述交通流的稳定性,加速干扰以及干扰的传播;检测高速公路上汽车车队的特性;检验管理技术和通信技术,使追尾事故减到最低限度;此外,还可以用于分析、计算道路通行能力。

车辆跟驰理论认为:一条车道的交通流中,车间距小于 125 米的车辆之间存在着一种可以定量描述的相互影响关系,后车的司机跟随前车行进,凭借感知能力、判断能力和控制能力,对前车一系列连续的刺激有规律地做出反应^[3]。

1.1.2 问题的提出

车辆跟驰理论作为最基础的交通流理论分支,早在 19 世纪 50 年代国外就开始了这方面的研究,至今已取得了一系列研究成果。在建模方法上,主要有刺激——反应模型和安全距离模型两大类^[4]。刺激——反应模型重在描述驾驶环境中各种刺激对司机行为的影响,具体包括 GM 模型^{[5]~[21]}、线性跟驰模型^{[22]~[25]}、心理——生理模型^{[26]~[40]}和模糊逻辑推理模型^{[45]~[49]},其中心理——生理模型是将刺激抽象为前后车之间的相对运动,包括速度和距离的变化,这些刺激只有超过阈值才能被司机感知并做出反应,从而建立相应的车辆跟驰模型。如张云龙(音)^[40]提出的多段式模型、MISSION^[34]系统中使用的多阶段模型等。模糊逻辑推理模型^{[45]~[49]}是近些年来发展较为迅速的跟车模型,该模型主要通过推理司机未来的逻辑阶段来研究司机的驾驶行为。这类模型最具特色的是把模型的输入项分为几个相互部分重叠的“模糊集”,每个模糊集用来描述各项的隶属度,一旦定义清楚隶属度的等级,就可以通过逻辑推理得到输出模糊集,如 MISSION 模型^[47],MITRAM 模型^[48]等。安全距离模型^{[7]、[41]~[44]}通过经典的牛顿运动定理寻找一个特定的安全跟车距离,如果前车司机做了一个突然的动作时,跟车距离在小于这个特定的安全跟车距离情况下,可能会发生碰撞,该模型主要应用于交通仿真,如 CARSIM 模型^[44]、SPEACS 模型^[43]、SISTM 模型^[42]。随着研究经验的积累,国外的跟驰模型越来越细致,越来越复杂。

另外,为验证这些模型的准确性、实用性,国外先后使用了各种各样的仪器设备,包括早期的机械式设备,如高速摄像机、钢丝传动装置、转速表以及后来的电子设备,如视频照相机、雷达、传感器、数字计算机、全球卫星定位系统(GPS)^[50]等,并提出了相应的数据采集方法。

我国在车辆跟驰方面的研究起步较晚,研究的范围主要集中在理论方面。其中,早期提出了基于运动学方程的车辆跟驰模型,并在考虑不同刹车距离的基础上,对该模型进行了改进^[51]。章三乐研究了直行车队通过交叉口行为特性,提出了相应的跟驰模型^[52]。陈建阳提出了关于速度平方的车头间距方程,并着重分析了交通流微观模型与宏观模型的关系^[53]。荣建在博士论文中提出了基于可变跟驰时间和随机因素的跟驰理论模型^[54]。段进宇针对混合车流,提出了车辆跟驰模型。吴正等针对低速混合型交通流,由流体连续方程结合流体动量公式建立了交通流的数值模型。冯苏苇和戴世强建立了考虑松弛项、可压缩项和道路面积可变项的交通流的数学模型。许轮辉^[55]提出了滞后时间与跟车状态有关的非线性跟车模型。何民^[56]也对跟驰状态的判定进行了探讨。

尽管现有的许多跟车模型已经应用于实践,但由于每个模型都存在或多或少的不足,以及各地交通流特性的差异,导致目前尚未有被普遍接受的跟车模型。“九五”重点攻关课题——道路通行能力研究^[1]发现:根据现有的跟车模型推算得到的通行能力远小于实测交通量。因此,现有的跟车模型和研究方法,还不能在我国进行实践性应用。主要表现在:

- ✧ 国外模型的研究对象与我国不尽相同:虽然国外提出了一些模型,但由于我国城市快速路中车辆动力特性、交通组成、司机行为特征与国外的情况存在显著差别,而车辆跟驰模型正是研究特定交通环境中的行为特性,二者的研究对象差别明显,所以只能在方法、思路借鉴国外的成功经验,而绝不可能照搬国外的现有成果;
- ✧ 标定、验证模型的数据受实验环境干扰严重:虽然国外采用了多种方法采集标定、验证各跟驰模型的数据,但由于实验场地多处于试验跑道或人为封闭的公路,且试验设备多数使实验车之间存在物理连接,对速度的要求较为苛刻,如钢丝等,所以在很大程度干扰了驾驶行为,使实验数据与真实的驾驶行为之间存在差别;
- ✧ 国内的跟驰模型缺乏坚实的数据支持:国内的跟驰模型或从车辆动力分析入手,或将交通流类比为特定的流体,缺乏对这些模型的标定、验证过程。

改革开放以来,我国正经历着经济高速发展的阶段,交通运输的发展尤为迅速。仅以北京市为例,在过去的15年间,北京市机动车年增长率一直维持在15%左右,截至2000年底全市民用机动车数已达159.8万辆。快速路上的交通量增加很快,三

环路断面日平均交通量约为 150000 余辆,东四环路开通一年之际,断面日平均交通量已经骤然增加到 80000 余辆(1999 年数据),存在着大量潜在交通安全隐患,为保证行车安全,有必要研究道路上,尤其是城市快速路上的司机行为和车辆运行的特征;随着计算机、电子和信息技术的发展,智能交通系统(ITS)应运而生,它为解决交通问题提供了新的思路,目前智能交通系统正蓬勃展开,司机行为和车辆运行特征是构建智能交通系统的基础;由于交通仿真技术在重现交通状况、节约人力、物力等方面具有的独特优势,该技术已经成为研究热点,其核心问题也需要研究司机行为和车辆运行特征。

因此,本研究选择了具有重要政治经济意义、实践中普遍关注的高速公路和城市快速路作为研究对象,针对高速公路和快速路中的车辆跟驰理论展开研究。从微观角度研究司机、车辆在快速路中的行为特征。其成果将为防止车辆追尾事故、构建智能运输系统(ITS)、实现交通仿真和估算通行能力提供理论基础。

1.2 研究的意义及目的

跟驰模型作为交通流理论的一个重要部分,对它研究有助于深入了解交通流特性。这种了解对于进行交通安全、交通管理、通行能力、服务水平等方面的分析都有着重要的意义。

首先,研究的目的是通过观察各车辆逐一跟驰的方式来了解单车道交通流的特性。这种特性的研究曾用于检验管理技术和通信技术,以便使在稠密交通时的追尾碰撞事故减少到最低限度。通过求解跟驰方程,可以得到任意时刻车队中各车辆的速度、加速度和位置,用于分析车队的安全状况,在此基础上,提出改进车队安全的措施。如给司机提供较多的信息、设法减少司机的反应时间等。此外,跟驰理论研究过程中需要对司机和车辆特性进行深入探讨,而这些特性对追尾碰撞的发生具有关键性的影响,控制影响碰撞的因素,达到提高安全行驶的目的。

直接由跟驰理论出发,可以对交通流稳定性进行分析。交通流稳定性有两个意思:一是指前后两车的速度大致相等,车间距离大体保持某一常数值,这称为局部稳定性;另一是指在车队中某车的速度变化向其后各车传播的特性,如速度变化的振幅在传播过程中扩大了,叫做不稳定,如振幅逐渐衰弱,则称为渐进稳定。对于稳定性的研究具有特殊意义,它有助于解释引起追尾事故和交通阻塞的原因,同时也可用于对隧道和瓶颈路段车流特性的分析与改进。在 60 年代,跟驰理论就被用于评估对司机跟随车辆的帮助系统、检验在城市快速路专用车道上运行的公共汽车车队的特性、预测短途车辆对市区交通流量和速度上的影响。现在,智能运输系统(Intelligent Transportation System)和一些先进的技术如自动智能巡航系统(Autonomous Intelligent Cruise Control System)的开发中,也对车辆的跟驰模型进

行大量细致的研究,以保证在自动控制下的车辆在跟随过程中能安全而平稳地行驶。

其次,对于跟驰理论的研究可以了解车辆相互影响时的运行特性,确定道路通行能力。在通行能力的理论分析过程中,通常以时间度量的车头时距和空间度量的车头间距为基础,推导通行能力的理论分析模型,司机对车头时距和车头间距的选择正是跟驰模型研究的核心问题。通过了解微观的车辆特性,可以从机理上对通行能力进行分析,得出合乎情理的通行能力。同时,由于跟驰理论从微观角度对于交通流中的每一个车单元的运动规律进行研究,它能定量地给出一些能反映司机在前进过程中的行驶自由性的指标(如加速度干扰、单位里程较大幅度的制动次数等),这些指标能反映出服务水平,对于将服务水平进行定量化描述有着一定的价值。

跟驰模型研究的另一重要运用是进行交通模拟,在二十世纪 80 年代后期所进行跟驰模型研究,基本上都是基于开发交通流仿真模型或是模拟驾驶而进行的。根据不同的开发目的,这些研究中的模型各有特点,如专门用于城市道路交通模拟的跟驰模型注重了对城市交通中车辆反复停车——起步的模拟、基于自动巡航系统模拟注重了对自动巡航系统的人机操作界面模拟、对司机在 ITS 道路条件下的驾驶模拟则注重于对司机的信息接受与处理的模拟等。通过对各种交通流的模拟,可以进行道路通行能力研究、服务水平划分、交通政策评价、管理策略检验、安全性分析、控制技术设备论证等方面的工作,从而改善交通环境、提高交通设施服务水平与效率。

本文的研究将为“十五”国家科技攻关重大项目——智能交通系统关键技术开发和示范工程之城市快速路通行能力研究和北京市 ITS 系统规划及示范工程之城市快速道路跟车模型研究而开发的交通流仿真模型提供一个高效、反应实际交通流车辆跟驰特性的模型。

1.3 研究内容

本研究主要进行了 5 个方面的研究工作:

1. 国内外研究综述:分析国内外同类研究的进程,发现不足,探讨改进方法,确定本研究的突破点;
2. 基于 GPS 的实时动态车辆跟驰数据采集方法的建立:建立基于高精度车载 GPS 车辆跟驰数据的采集方法,并获得大量源自实际交通流的时间序列跟车数据,为本研究奠定数据基础;
3. 基于混沌动力学的车辆跟驰模型的建立:以定性和定量相结合的方法说明了跟驰车队中的混沌现象,利用时滞微分方程构建基于混沌动力学的城市快速道路跟车模型;

4. 车辆跟驰模型各特征参数之间的统计关系研究：根据实测数据，通过数据处理和分析，发掘关键特征参数的统计规律，求解基于混沌动力学的车辆跟驰模型；
5. 模型验证：以定性和定量相结合的方法对模型进行验证，确定模型的有效性。

1.4 主要研究成果

本文的主要研究成果如下：

1. 发现国内外大多数关于跟车理论的研究缺乏源自实际交通流的时间序列跟车数据，本文正是以此为突破点进行研究；
2. 建立了基于高精度车载 GPS 车辆跟驰数据的采集方法，并获得了大量源自实际交通流的时间序列跟车数据；
3. 加速状态后车司机反应时间服从 $N\sim(2.01, 0.22)$ 的正态分布，减速状态后车司机反应时间与速度成反比关系；
4. 稳定跟车状态不同的速度下司机与前车之间保持期望车头间距，稳定跟车状态跟车行为具有振荡现象；
5. 以定性和定量相结合的方法说明了跟驰车队中的混沌现象；
6. 利用时滞微分方程构建了基于混沌动力学的城市快速道路跟车模型；并在 GIS 环境中开发了城市快速路模拟系统。
7. 经过模型检验，基于混沌动力学的城市快速道路跟车模型具有有效跟车模型应具备的渐进稳定性、非对称性、以及目标与偏移等特性，另外该模型有比较高的预测精度。

第二章 跟车模型研究综述

2.1 跟车模型研究回顾

2.1.1 国外跟车模型研究回顾

一、GM (General Motor) 模型

20 世纪 40 年代末, 世界经济发展较快的国家, 汽车运输迅速发展。汽车运输在各种交通运输方式中所占的比重逐渐扩大, 其地位日益重要。但是, 随着汽车运输的发展, 交通事故和交通阻塞骤增。由于交通问题日益严重, 迫使各国投入大量人力、物力进行交通流基础理论和交通管理研究。交通量的增长使交通流中各车辆的独立性越来越小, 早期分析交通流所采用的概率论方法越来越不适合, 需要交通流理论研究者寻求新的模型^[57]。近些年来, 在交通安全和交通工程研究领域跟车的话题变得日益突出。尤其是描述同一条车道上相邻车辆之间的相互作用的模型也已成为许多重要研究领域的基础, 如模拟模型、先进车辆控制和安全系统 (AVCSS)^[58]等。

自从 Reuschel^[59] (1950) 和 Pipes^[60] (1953) 利用运筹学技术首次成功解析跟车模型以来, 这方面的研究已经持续了半个世纪。50 年代后期和 60 年代早期研究的 GM 模型是最为著名的模型, 其公式为:

$$a_{n+1}(t+T) = cv_{n+1}^m(t+T) \frac{\Delta v(t)}{\Delta x^l(t)} \quad \text{式 2.1}$$

这里: $a_{n+1}(t+T)$ —— $t+T$ 时刻第 $n+1$ 辆车的加速度;

$v_{n+1}(t+T)$ —— $t+T$ 时刻第 $n+1$ 辆车的速度;

T —— 反应时间;

$\Delta v(t)$ —— t 时刻第 n 辆车与第 $n+1$ 辆车之间的速度差;

$\Delta x(t)$ —— t 时刻第 n 辆车与第 $n+1$ 辆车之间的距离;

c, m, l —— 为常数。

50 年代后期在底特律的通用汽车研究实验室 Chandler, Herman 和 Montroll^[6] (1958) 最终推导出这个公式——跟车模型的第一个原型, 与此同时在日本进行研

究的 Kometani 和 Sasaki^[7] (1958) 也得出了同样的结论。这个模型的基本假设在于: 司机的加速度与前后两车之间的速度差成正比; 与前后两车间的距离成反比; 同时自身的速度也有直接的影响。随后在实验跑道上进行了一次跟车试验, 对此模型进行了初次标定, 这次试验使用了 8 位司机, 每两辆车之间用带卷筒的金属线连接, 可以直接测量出车间距和相对速度, 前车的速度在 10 到 80 英里每小时之间变化, 试验持续了 30 分钟。通过分析试验数据发现, 在假设速度差和车间距与加速度呈线性关系条件下得到两个结论: 第一, 车间距和加速度之间具有很好的相关性, 相关系数达到 0.8, 同时由于车头间距对加速度的影响很小, 可以忽略不计, 从而产生了一个 GM 子模型, 即 $l = m = 0$; 第二, 常数 T 取值范围为 1.0~2.2 秒, 但其均差变化幅度比较大 (0.17~0.74 秒)。

随后, GM 模型发展地非常迅速, 1959 年 Herman, Montroll, 和 Potts^[8] 进一步认为: 造成同一个速度差 Δv 产生不同的相关系数的原因是由于司机的加速过程中存在不可避免的自然的波动, 司机不可能在油门上施以非常精确的压力以产生理想的加速度。实验跑道上的试验表明, 四个司机为了保持相同的一个恒定的速度, 在油门上压力的波动在正负 10 克, (标准差非常小约为 2%), 这种波动与速度的大小是没有关系的。

同一年 Gazis, Herman 和 Potts^[5] 尝试在微观模型的基础上来探索描述速度——流量关系的宏观模型。这种基于微观模型的宏观关系和当时应用的宏观关系之间存在差异, 这些差异导致一些假设, 即把 $1/\Delta x$ 和灵敏度 c 合并为 $c/\Delta x$, 使两种方法的差异最小。这样就得到了一个新模型 $m = 0, l = 1$ 。Herman 和 Potts^[9] (1959) 进行了一系列新的试验, 同往常一样两辆车之间用装有卷筒的金属线连接, 不同的是这次用了 11 位司机, 在实际道路上进行试验。试验地点选择在纽约附近的三个隧道里进行。11 个司机分别在隧道中跑了 4~16 个来回, 平均每个来回 4 分钟左右。实验结果表明, 当车间距在 15~50 米之间波动时, 可以得到一个较以往更能符合实际的跟车模型 ($m = 0, l = 1$), 相关系数 r^2 范围为 0.8~0.98, 平均反应时间 T 为 1.2 秒。新的敏感度常数 $c = 19.8 \text{ ft/s}$, 相比而言, 以前的敏感度常数 $c = 27.4 \text{ ft/s}$ 。

1960 年, Edie^[10] 尝试用一些宏观数据来拟和 $m = 0, l = 1$ 模型, 所用的方法与 Gazis, Herman 和 Potts^[5] 相似。研究发现: 应该引入速度变量对敏感度常数进行修正, 这样就产生了一个新模型 $m = 1, l = 1$ 。次年, Gazis, Herman 和 Rothery^[11] 用这种方法去标定其宏观模型的敏感度常数。通过分别引入不同的 m 和 l , 速度差 Δv 和车间距 Δx 影响系数产生较大的变化。通过分析 18 组数据, 验证所有的 m 和 l 的组合, 尽

管相关系数值变化不大, 最可信的一些组合落在 $m = 0 \sim 2, l = 1 \sim 2$ 的范围之间。由于 Edie 模型在密度趋近于零时, 能够预测到一个自由流速度, 因此该模型在流率较低时表现比较好。研究中第一次提出用两个独立的模型去描述交通流, 一个描述非拥挤状态, 一个描述拥挤状态。

随后的 15 年中进行了许多类似的研究, 他们都尝试着去标定 m 和 l 之间最佳组合。这些研究中值得一提的是下面这些研究:

- 1) May 和 Keller^[61] (1967) 通过分析一组新的数据发现了一个最佳整数组合 $m = 1, l = 3$, 同时也提出了一套非整数的组合 $m = 0.8, l = 2.8$, 敏感度常数约为 1.33×10^{-4} 。
- 2) Heyes 和 Ashworth^[12] (1972) 尝试着把 GM 的一般模型和 Michaels^[26] 提出的感知模型结合起来考虑。模型中, 刺激被 $\Delta v / \Delta x^2$ 代替, 敏感度常数变为 Δt^p 。利用在英国 Mersey 中测得的数据标定为 0.8, 这个模型与 $m = -0.8, l = 1.2$ 的 GM 模型非常相似。
- 3) Ceder 和 May^[13] (1976) 用了与以往相比更多的数据, 发现了以最佳组合 $m = 0.6, l = 2.4$ 。他们的主要新进展在于“两阶段”方法, 这种方法比以往的单阶段模型能跟很好地拟和观测数据。他们用 $m = 0, l = 3$ 模型来描述非拥挤状态的交通流, 用 $m = 0, l = 0$ 或 1 来描述拥挤状态的交通流。

Treiterer 和 Myers^[14] (1974) 在微观上对 GM 模型进行了进一步标定。他们用航拍照片来记录车辆的运行轨迹, 测量出速度 v 和车间距 Δx , 然后根据司机所采取的不同驾驶动作, 把跟车过程中司机加速和减速阶段分为两个独立的过程, 得到两个不同的模型: 对于加速过程模型为 $m = 0.2, l = 1.6$, 对于减速过程模型为 $m = 0.7, l = 2.5$ 。与此同时, Hoefs(1972)发现: 对于加速过程模型为 $m = 1.5, l = 0.9$, 对于没有进行刹车的减速过程模型为 $m = 0.2, l = 0.9$, 对于进行了刹车的加速过程模型为 $m = 0.6, l = 3.2$ 。

Ceder^{[15][16]} (1976, 1978) 也提出了一个改进 GM 模型。模型中传统的敏感度项 $v''' / \Delta x'$ 被 $A^{-s} / \Delta x^2$ 代替。这里 s 是阻塞时的车间距。在自由流状态时 A 取 0, 跟

车状态时 A 取 1~10 之间的数值。Ceder^[17]在后来发表的文章中尝试在微观方面调整他的假设,他根据 Gordon 和 Hoefs^[18](1972)所观测到的 GM 一般模型不能产生“螺旋轨迹”断言:GM 一般模型是错误的。(但事实并非如此,在一定的条件下,GM 一般模型可以产生“螺旋轨迹”。)

自从 70 年代后期以来,人们对 GM 模型的研究和标定越来越少。仅有两个研究值得注意:

- 1) Aron^[19](1988)利用特制测试车在巴黎采集了一般条件下的跟车数据,总共收集了 60 分钟的数据,平均速度为 7 米/秒,平均车间距为 14 米。分析中他把后车司机的反应分为三个阶段:减速阶段,稳定跟车阶段,加速阶段。研究发现减速阶段模型为 $c = 2.45, m = 0.655, l = 0.676$, 稳定跟车阶段模型为 $c = 2.67, m = 0.26, l = 0.5$, 加速阶段模型为 $c = 2.46, m = 0.14, l = 0.18$ 。
- 2) Ozaki^[20](1993)用摄像机在路旁 32 层的办公楼顶上收集了 90 分钟的跟车数据,摄像机可以提供 160 米的视野,总共包括 2000 辆车的跟车数据。通过分析得到了 GM 模型的最佳参数组合:减速阶段模型为 $c = 1.1, m = 0.9, l = 1$, 加速阶段模型为 $c = 1.1, m = -0.2, l = 0.2$ 。应该注意到,参数的取值比较小,这可能是由于对每辆车的观测时间较短,小于 10 秒。

对 GM 模型的研究的不同参数组合如表 2-1 所示。

表 2-1 GM 模型最优参数组合汇总表

来源	m	l	方法
Chandler 等(1958)	0	0	微观
Gazis, Herman and Potts (1959)	0	1	宏观
Herman and Potts (1959)	0	1	微观
Helly (1959)	1	1	宏观
Gazis 等 (1961)	0-2	1-2	宏观
May and Keller (1967)	0.8	2.8	宏观
Heyes and Ashworth (1972)	-0.8	1.2	宏观
Hoefs (1972) (非减速停车、减速停车、加速)	1.5/0.2/0.6	0.9/0.9/3.2	微观
Treiterer and Myers (1974) (减速、加速)	0.7/0.2	2.5/1.6	微观
Ceder and May (1976) (单阶段)	0.6	2.4	宏观
Ceder and May (1976) (非拥挤、拥挤)	0/0	3/0-1	宏观
Aron (1988) (减速、稳定跟车、加速)	2.5/2.7/2.5	0.7/0.3/0.1	微观
Ozaki (1993) (减速、加速)	0.9/-0.2	1/0.2	微观

正如表 2-1 所示,在标定和验证 GM 模型方面已经作了大量的工作。然而现在却较少使用这个模型。很明显是由于在确定 m 和 l 的过程中出现了大量的矛盾。造成矛盾的原因有两个:第一,跟车行为是非常易于随着交通条件和交通流状态的变化而变化,目前至少在微观方面已经证明这一点,如 Rockwell 和 Treiterer^[21](1966);第二,大量的研究和试验是在低速度和停停走走状态的交通流中进行,而这种状态的交通流不能很好地反映一般的跟车行为。如果从表 2-1 中删除这些研究结果,剩下的参数组合更为可信。如表 2-2 所示。

表 2-2 GM 模型最可信参数组合汇总表

来源	m	l	方法
Chandler et al. (1958)	0	0	微观
Herman and Potts (1959)	0	1	微观
Hoefs (1972) (无减速停车、减速停车、加速)	1.5/0.2/0.6	0.9/0.9/3.2	微观
Treiterer and Myers (1974) (减速、加速)	0.7/0.2	2.5/1.6	微观
Ozaki (1993) (减速、加速)	0.9/-0.2	1/0.2	微观

可以看到,从表 2-1 中删除模型的参数值具有明显的离散性,事实上对于前两个试验模型 Gazis, Herman and Potts (1959)模型和 Helly (1959)模型,没有考虑到数据是处于不同的交通流状态,从而造成了分析结果在某种意义上的平均值。再者,对于后两个试验模型 Ceder and May (1976) (非拥挤、拥挤)模型和 Aron (1988) (减速、稳定跟车、加速)模型,其试验方法是不可取的,两个实验中,一个是通过航空摄影来采集数据,另一个是用楼顶上的摄像机。从如此远的距离来测量车辆,在每一帧图像中车辆的尺寸非常小,这样在测量距离和车间距时会产生较大的误差,严重地影响到模型的稳定性,作为最终计算结果的加速度受到的影响最大。

从表 2-2 的数据可以看出,减速阶段的刺激随速度差变化的增加而增加,因为此时司机对安全的重视程度增加了;加速阶段的刺激主要随着 $1/\Delta x$ 的增加而增加。Treiterer, Myers 和 Ozaki 普遍认为速度差变量是影响刺激的主要因素之一,而对刺激和 $1/\Delta x$ 之间的关系的认识却出现了分歧。Chandler (1958)和 Ozaki (1993)认为 $1/\Delta x$ 对刺激的没有贡献或贡献很小,而 Hoefs (1972)认为 $1/\Delta x$ 对刺激在加速阶段影响较大,减速阶段影响较小, Treiterer and Myers (1974)认为 $1/\Delta x$ 对刺激在加速阶段影响较小,减速阶段影响较大。由于缺乏有力的证据来证明 $1/\Delta x$ 与刺激之间的关系,导致该模型渐渐被人忽略了,直到 1995 年 Low 和 Addison^[62]尝试从另一个角度来研究 GM 模型,他们以 $c = 0.3, m = 0, l = 1$ 模型为起点,同时又在模型后加上一个修正项,即实际车间距和理想车间距之差的立方项,取理想车间距为 30 米,遗憾的是至今为止仍未用实测数据对该模型进行标定。

二、线性跟车模型

尽管 Chandler, Herman 和 Montroll^[6]所提出的 GM 模型在研究的初始阶段是线性的, 但是 Helly^[22] (1959) 对线性跟车模型发展的贡献却是不可忽视的。他所提出的新线性跟车模型考虑了前方 2 辆车是否制动减速对后车加速度的影响项。模型如下所示:

$$\begin{aligned} a_n(t) &= C_1 \Delta v(t-T) + C_2 (\Delta x(t-T) - D_n(t)) \\ D_n(t) &= \alpha + \beta v(t-T) + \gamma a_n(t-T) \end{aligned} \quad \text{式 2.2}$$

这里: $D(t)$ ——期望跟车距离;

C_1 ——Helly 借用先前的研究成果, 即通过对 14 个司机的跟车行为调查, 在相关系数大于 0.8 时, T 的取值范围为 0.5 ~ 2.2s, C_1 的取值范围为 0.17 ~ 1.3, 平均 $T = 0.75$, $C_1 = 0.5$ 的情况下, 得到的结果;

C_2 ——通过设置 Δv 和 Δx , 使前后车的加速度相等, 即相对加速度为零。

这样就产生下面的最终公式:

$$\begin{aligned} a &= 0.5 \Delta v(t-0.5) + 0.125 (\Delta x(t-0.5) - D_n(t)) \\ D_n(t) &= 20 + v(t-0.5) \end{aligned} \quad \text{式 2.3}$$

值得注意的是 Helly 相信在进一步的研究中, C_1 应当与车间距变量 $1/\Delta x$, 反应时间 T , 以及速度变量有关。这样就产生了 $m=0, l=1$ 的 GM 模型。

Hanken 和 Rockwell^[23] (1967) 以及 Rockwell, Ernst 和 Hanken^[24] (1968) 对线性跟车模型做了进一步的研究和标定。他们分别在“理想”的道路和拥挤的城市街道上进行试验。测试车与早期 GM 模型测试车一样, 车与车之间用带卷轴的金属线连接, 3 个司机, 每个司机收集 10 分钟的数据, 时间间隔为 0.5 秒, 速度在 20~60 英里每小时之间变化, 车间距在 40~250 英尺之间, 当滞后时间为 2 秒时, 得到最大相关系数, 此时模型表达式为:

$$\begin{aligned} a(t+T) &= 0.016 + 0.058(\Delta x - 134) + 0.498(v_{n-1} - 31.6) - 0.546(v_n - 31.6) \\ &= 0.058\Delta x + 0.498\Delta v - 0.048v_{n-1} - 6.24 \end{aligned} \quad \text{式 2.4}$$