

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 49



基于诱导信息的交通 流动力学特性与非线性 密度波研究

- 作者：葛红霞
- 专业：流体力学
- 导师：戴世强



G643/19p

001289226

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 49



基于诱导信息的交通 流动力学特性与非线性 密度波研究

- 作者：葛红霞
- 专业：流体力学
- 导师：戴世强

贵阳学院图书馆



图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 1 辑/博士学位论文编辑部编. —上海:上海大学出版社,2009. 12

ISBN 978 - 7 - 81118 - 511 - 9

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162521 号

2006 年上海大学博士学位论文
——第 1 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人:姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 264.75 字数 7 376 千

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—400

ISBN 978 - 7 - 81118 - 511 - 9/G · 513 定价:1000.00 元(50 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

Research on Traffic Dynamical Characteristics and Nonlinear Density Waves with Consideration of Navigation

Candidate: Ge Hongxia

Major: Fluid Mechanics

Supervisor: Dai Shiqiang

Shanghai University Press

• Shanghai •

答辩委员会评语 上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任: 吴清松 教授,中国科学技术大学

委员: 顾国庆 教授,华东师范大学

刘允才 教授,上海交通大学

莫嘉琪 教授,安徽师范大学

夏 南 教授,上海大学

王道增 教授,上海大学

董力耘 副教授,上海大学

导师: 戴世强 教授

答辩日期: 2006 年 3 月 12 日

答辩过程中,葛红霞同学能够正确回答所提出的问题。

学大商工

合研人師，查审员委村全会员委職答登文新本

。求要量測文新出學士新學大商工

评阅人名单：

吴清松 教授，中国科学技术大学

高自友 教授，北京交通大学

顾国庆 教授，华东师范大学

单及会员委職答

学大商工，對姓

学大商工，對姓

学大商工，對姓

学大商工，對姓

学大商工，對姓

学大商工，對姓

對姓 孫安慶：副主

日 51 月 8 年 2008：開日續答

答辩委员会对论文的评语

该论文选题的学术起点高,在理论和实用方面均有重要意义。论文包含了关于路段交通流理论中若干前沿性问题的研究工作。基于现有交通流的宏观模型,考虑 ITS 技术的应用和模型的实际可用性,提出若干新的改进模型,探讨了宏观模型与微观模型之间的关系,并细致考察了交通流中普遍存在的各种非线性密度波,得到了一系列有实际意义的结果。本文创新点主要体现在如下四个方面的工作中:

(1) 在 NaSch 元胞自动机交通流模型基础上,分别发展了计及可变安全间距、可变安全间距敏感驾驶、合作驾驶元胞自动机三种新的交通流模型,其结果更符合实际交通情况;

(2) 将优化速度类车辆跟驰模型三种方程表达形式进行比较和归纳,得到可用统一形式的方程和解来分析该类模型的非线性密度波的传播特性;

(3) 基于 ITS 的应用,提出了合作驾驶车辆跟驰模型和两种合作驾驶格子流体力学模型,分别从微观和宏观的角度考虑了前方任意车辆和格点对交通流演化的影响,同时细致地研究了在亚稳定区域和不稳定区域密度波的非线性特征;

(4) 建立了具有粘性耗散次的流体力学模型,从宏观的流体力学模型角度分析了交通流中出现的非线性密度波现象。

答辩过程中,葛红霞同学能够正确回答所提出的问题。

答辩委员会一致认为,该论文思路清晰,推导严密,结果正确,包含了多项创新性工作,显示出作者具有扎实的数理基础和系统深入的专业知识,表现出很强的独立科研能力,是一篇优秀博士学位论文。

答辩委员会表决结果

经无记名投票表决,答辩委员会(7票)通过葛红霞同学的论文答辩,并建议授予博士学位。

答辩委员会主任签名: **吴清松**

2006 年 3 月 12 日

摘 要

本文的工作旨在研究路段交通流理论中的若干前沿性问题:在现有交通流宏微观模型的基础上,考虑到智能交通运输系统的效能和模型的实际可用性,提出改进的模型,并进行相应的理论分析和数值模拟;进而探讨宏微观模型之间的相互联系;特别侧重于考察交通流中普遍存在的各种非线性密度波。全文的主要工作如下:

一、在 NaSch 元胞自动机模型中考虑可变安全间距和期望效应对交通流演化的影响。

在 NaSch 元胞自动机交通流模型的基础上,考虑最近邻车辆对当前车辆运动状态的影响时,引入有效间距,并提出可变安全间距的新概念。传统的安全间距通常设置一个最小值,并且取为常数,而可变安全间距则与当前车速度成正比,亦即,当前车的车速越大,所需的安全间距也就越大。根据数值试验的结果,确定了可变安全间距与当前车速度的一个比例因子,称之为速度调节因子 $\tau = 0.5$,从而建立一种新模型——计及可变安全间距的 NaSch 模型。在此基础上,我们进一步研究改变慢化概率步骤在演化规则中的顺序对模型产生的影响,提出另一种新的元胞自动机模型——可变安全间距敏感驾驶模型。模拟结果显示,两种改进的模型所得到的最大流量均大于 NaSch 模型得到的结果,更符合交通实测数据,而用敏感驾驶可变安全间距模型模拟得到的结果更接近于实际。我们还给出

了一种基于智能交通系统(ITS)考虑的元胞自动机新模型,即合作驾驶元胞自动机模型。模型中包括了刹车灯、可变安全间距以及慢启动等现实交通因素。文中还分析快车和慢车并存的混合交通流,数值模拟表明:车流中只要有慢车加入,不论比例大小,都会极大程度地影响整个交通流量,因此有必要严格执行快慢车分道行驶的规则,这应该成为解决我国当前交通难题的有效手段之一。我们还探讨该模型中提供诱导信息的最佳前方车辆数目,提出选取方案,并通过随后的跟驰模型和格子流体力学模型分析给出了理论说明。合作驾驶能够大幅度提高道路实际通行能力,从而进一步证实 ITS 是发展现代化交通的行之有效的途径。

二、将车辆跟驰模型中方程的三种类型进行比较和归纳,导出 KdV 和 mKdV 方程的解的统一形式。

归纳了车辆跟驰模型中方程的三类表现形式:一阶常微分方程、二阶常微分方程和差分方程;研究在不同交通流区域中密度波所呈现的形式,大致分为:稳定性区域、亚稳态区域和不稳定区域。对不同的区域可以导出各自的非线性发展方程: Burgers 方程、KdV 方程和 mKdV 方程,用以描述相应的密度波。三类方程密度波的推导过程既有类似之处,也有一定的区别,经过详细比较,针对不同情形得到的统一方程及其统一解,只要能将各方程相应的系数代入统一方程中,就能快速准确地得到结果。我们把得到的结果与已知工作进行对比,发现在同样的参数条件下两者一致,说明了统一方程和统一解的正确性。对于未进行过密度波非线性分析的模型(例如姜锐-吴清松的全速度差模型),用我们的思路也可以迅速得到所需要的解。

因此,我们的方法具有普遍适用性和有效性。

三、基于 ITS 的应用,提出了合作驾驶车辆跟驰模型,考虑了前方任意辆车对交通流演化的影响。同时细致地研究了在亚稳态区域和不稳定区域密度波的非线性特征。

根据 ITS 诱导下的合作驾驶车辆跟驰的思想,给出新的优化速度函数——即描述前方 n 辆车与当前车运动之间关系的非线性函数,把前方 n 辆车作为一个整体来分析,考虑了非局部效应。通过线性稳定性分析得到中性稳定曲线,并用约化摄动法导出密度波演化的 mKdV 方程和 KdV 方程。当 $n=1$ 时,所得结果与已有的研究结论相一致,数值模拟与解析结果完全吻合。理论上来说, n 值越大,交通流会越稳定;而 n 越大,需要收集和处理的交通诱导信息量就越大。经分析,我们确定 $n=3$ 是合作驾驶跟驰模型的优化状态,也就是说,仅考虑前方 3 辆车对当前车的影响既可以有效地舒解交通拥堵,又不会产生资源浪费或导致交通诱导的困难。通过对该模型的分析,为合作驾驶元胞自动机模型中提供诱导信息的前方车辆数的选取提供了理论基础。通过数值模拟观察到,同样条件下,小扰动在合作驾驶跟驰模型中随着 n 的增大而发展为交通堵塞的可能性下降;同样,在大扰动下,考虑前方 3 辆车比仅考虑前方 1 辆车使交通流更加稳定,频繁出现的时走时停交通会转变为宽幅运动阻塞。

四、基于 ITS 的应用,提出合作驾驶格子流体力学模型,从宏观角度考虑前方任意辆车对交通流的影响。研究了不稳定区域密度波的非线性特征。

从宏观模型出发研究 ITS 的应用显示出一定的优越性。

我们提出两种合作驾驶格子流体力学模型。模型中给出新的优化速度函数,同样考虑非局部效应。在临界点附近,获得了两种模型的非线性密度波方程——mKdV 方程,用以描述导致交通阻塞产生的扭结-反扭结密度波。线性稳定性分析和数值模拟表明,模型在选取不同的优化速度函数时,虽然得到了不同的临界敏感度和小扰动传播速度,但差别并不显著,因而确定了前方要考虑的格子数 $n = 3$ 是优化状态,与微观跟驰模型相一致。当 $n = 1$ 时,所得结果与已有文献给出的结论一致。该类模型从宏观角度同样为合作驾驶元胞自动机模型前方车辆数的选取提供了理论依据。

五、从宏观的流体力学模型角度分析交通流中出现的非线性密度波现象。首先,对姜锐-吴清松的速度梯度模型做了合理的修正,进一步研究其非线性密度波特性的;其次,从 Payne 的跟驰思想出发,建立微观和宏观的联系,提出新的具有黏性耗散项的流体力学模型。

在速度梯度模型的基础上,对模型密度波的非线性分析进行研究。利用 Berg 等人给出的车头间距-密度关系式,得到带有黏性项的新的连续介质模型。通过线性稳定性分析得到中性稳定曲线,并在它的附近推导出描述交通拥堵密度波的 KdV 方程。利用 Payne 的跟驰思想,考虑了由薛郁和戴世强提出的双时间尺度——车辆运作的延迟时间 τ 和驾驶员的反应时间 T ,运动方程中引入密度差项,经过 Taylor 展开,采用直观推断法得到新的模型——密度黏性流体力学模型。同样,对该模型进行线性稳定性分析得到中性稳定曲线,并在它的附近研究密度波传播的非线性特性。最终也得到描述交通堵塞密度波的

KdV 方程及其解。

总之,本文采用微观模型和宏观模型对交通流的建模和模拟进行较为细致的分析,根据当前的交通实际和未来实现交通智能化的前景,提出更符合实际的和有前瞻性的若干新的路段交通流模型,考察它们在缓解交通拥堵中的作用,并对交通流中普遍存在的密度波做了较为深入细致的分析,得到一些有实际意义的结果。在本文的最后,我们对道路交通流的进一步研究做了分析和展望。

关键词 交通流,元胞自动机(CA)模型,跟驰模型,格子流体力学模型,流体力学模型,智能交通系统(ITS),KdV 方程,mKdV 方程

Abstract

In this dissertation, based on the existing macroscopic and microscopic models for traffic flow, several improved mathematical models in accordance with the rapid development of Intelligent Transportation System (ITS) are proposed, and the corresponding theoretical analysis and numerical simulation are performed. In addition, the relationships between macroscopic and microscopic traffic models are examined, in which emphasis is particularly laid on the investigation of the various nonlinear density waves in traffic flows. The contents of the dissertation are as follows.

I. A novel concept about the variable security gap and effective gap are introduced into the original NaSch cellular automata model, resulting in several improved CA models.

With the consideration of the influence of leading car on the following one, the effective gap is introduced into the original NaSch cellular automaton model, and a novel concept about the variable security gap is proposed. The security gap was regard as a minimum constant in previous work, while we claim that it is variable according to the velocity of the studied car, that is, a faster car needs longer security distance to its leading car compared with a slower one. Through simulation we determined the proportional constant in the relation

between the variable security gap and the velocity of studied car, named as speed adjusting coefficient for security gap, which should be taken as $\tau = 0.5$. In this way, a new model — variable security gap NaSch model is established. With the aid of the model, we studied further the effect and differences brought about by the different orders of the randomization step in the evolution rule, and put forward a new cellular automaton model — variable security gap sensitive driving model. The simulation results indicate that the maximum flow deduced by the above modified models are larger than that by the NaSch model and moreover the maximum flow of the latter is in better agreement with the observed data. A novel cellular automaton model for traffic flow on highway is thus proposed by considering Intelligent Transportation System (ITS), called the cooperative driving cellular automaton model. It includes some factors related to real traffic such as the effective gap, brake light, and the variable security gap. The simulation results show that the mixed traffic flow related to two different maximum vehicular velocities is considered. Even few slower vehicles in faster vehicle flow will lead to the drastic decreasing of flow rate, which demonstrates the necessity to implement strictly special fast-car lane. In addition, we suggest the appropriate number of front vehicles providing information, which could be demonstrated theoretically by the car-following model and lattice hydrodynamic model as shown in the following chapters. The cooperative driving could lead to the

improvement of traffic flow, which further indicates that the ITS is one of the effective ways to develop modernized transportation.

II. Three versions of car-following models are investigated, from which the unified solutions for the KdV and mKdV equations are derived.

We have investigated three different forms of equations for formulating the car-following models: the first-and second-order ordinary differential equations, and the difference equation. In general, the behavior of traffic flow shows distinct characters in the following three different regions: the stable, metastable and unstable ones. Different nonlinear wave equations are derived to describe the corresponding density waves, among which the Burgers, KdV and mKdV equations depict the density waves appearing in the three distinct regions respectively. The processes of deriving the nonlinear wave equations for the three versions are not all the same. Through meticulous comparison, the unified equations and their solutions for the three versions of equations are given. If we could obtain the coefficients of the unified equations, the results will be worked out by substituting them to the unified solutions. Under the same conditions, we could get the same results as those in previous work, which demonstrates the validity of our unified equations and their solutions. Moreover they are applied to analyze the generalized car-following models (such as the Full Velocity Difference Model proposed by Jiang and Wu) and

the corresponding KdV and kink-antikink soliton solutions could be quickly obtained, which proves the effectiveness and straight forwardness of the unified formulation presented herein.

III. The cooperative driving car-following model is proposed by incorporating the concept of ITS in traffic flow and considering the influence of the behavior of more vehicles ahead on traffic flow. The nonlinear characteristics of density waves appearing in the metastable region and unstable region are studied in detail respectively.

In the light of constructing a cooperative driving system, we give a novel form of optimal velocity function, in which the relation between the vehicles ahead and the vehicle motion is nonlinear, taking into account the non-local effect and regarding the vehicles ahead as a whole. The neutral stability line is obtained by using the linear stability analysis and the KdV equation and mKdV equation are derived through nonlinear analyses. As $n = 1$, the result is consistent with that in previous work. The results of numerical simulation are presented to illustrate the theoretical conclusions. Theoretically, utilizing the information of more vehicles in front leads to the stabilization of traffic systems, while the information needed to be received and transacted will be much more. The simulation results confirm that the stability analysis for the cooperative driving car-following model is correct and give the optimal state as $n = 3$, that is to say, only the information of three cars ahead is sufficient for