

# 交通流与颗粒流

唐孝威 张训生 陆坤权 主编

责任编辑：梁 兵

封面设计：俞亚彤

2004年5月第1版 ISBN 7-89999-527-2/TH·000



浙江大學出版社

# 交通流与颗粒流

唐孝威 张训生 陆坤权 主编

浙江大学出版社

责任编辑 徐素君 陈永欣  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
(E-mail: [zupress@mail.hz.zj.cn](mailto:zupress@mail.hz.zj.cn))  
印 刷 浙江大学印刷厂  
开 本 787mm×960mm 1/16  
印 张 14  
字 数 275 千  
版 印 次 2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷  
印 数 0001—1000  
书 号 ISBN 7-89999-527-2/TH·000  
定 价 21.00 元

此为试读, 需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

# 前 言

公路及城市交通是与国计民生密切相关的重大问题,涉及交通规划、管理、工程、技术等很多领域。交通流是一个复杂体系的运动,数学、物理和力学界的专家学者对其运动规律的研究产生浓厚兴趣。交通流研究也是交通工程技术发展的关键和基础问题。

为了推动我国公路及城市交通流理论与应用的基础研究,2001年12月在浙江大学召开了一次交通流问题的研讨会,来自中科院物理所、浙江大学、中科院理论物理所、清华大学、上海大学、北京大学、上海交大、中国科大和香港中文大学的数学、物理力学及交通工程方面的20位专家、学者参加了研讨会。杨国桢院士及国家自然科学基金委数理学部副主任周青教授也参加了研讨会。

研讨会上有15人作了关于交通流的学术报告,并对交通流研究的国内外发展情况及我国现状和问题等进行了讨论。一致认为,交通流问题是关系到国家经济、社会发展及人民生活的重要研究领域;交通流的基础研究也是多学科交叉的重大前沿研究方向。颗粒流和交通流有一些类似之处,研究颗粒流的规律将有助于对交通流的认识,因此开展颗粒流的理论和实验研究也很有意义。

在这次研讨会的基础上,根据到会专家的建议,把会议材料汇编成本书,共有论文13篇。其中“交通流与颗粒流”一文是以几位专家合写的“交通流理论与应用的基础研究”建议书为基础重写而成的。

本书的出版得到国家自然科学基金(批准号10274071)的资助和浙江大学理学院的支持,特此致谢。

张训生 陆坤权 唐孝威

2004年5月

# 作者名单

(按姓氏笔画排序)

- 刘允才(上海交通大学电子信息学院,上海 200030)  
刘寄星(中国科学院理论物理所,北京 100080)  
许伯铭(香港中文大学物理系,香港新界沙田)  
陆坤权(中国科学院物理所,北京 100080)  
陈叔平(浙江大学数学系,杭州 310027)  
吴清松(中国科学技术大学工程科学学院,合肥 230026)  
汪秉宏(中国科学技术大学近代物理系,合肥 230026)  
张训生(浙江大学物理系,杭州 310027)  
李晓白(中国科学技术大学工程科学学院,合肥 230026)  
郑兴宇(上海交通大学电子信息学院,上海 200030)  
厚美瑛(中国科学院物理所,北京 100080)  
姜 锐(中国科学技术大学工程科学学院,合肥 230026)  
胡国琦(浙江大学物理系,杭州 310027)  
段进宇(清华大学建筑学院,北京 100084)  
唐孝威(浙江大学物理系,杭州 310027)  
鲍世宁(浙江大学物理系,杭州 310027)  
鲍德松(浙江大学物理系,杭州 310027)  
缪立新(清华大学土木水利学院,北京 100084)  
薛 郁(上海大学上海市应用数学和力学研究所,上海 200072)  
戴世强(上海大学上海市应用数学和力学研究所,上海 200072)

## 目 录

交通流与颗粒流 .....	陆坤权 张训生 缪立新 戴世强	(1)
	陈叔平 鲍世宁 唐孝威	
交通流概论 .....	段进宇 缪立新	(5)
交通流中的自组织临界性和相变行为研究进展 .....	汪秉宏	(17)
交通流的微观模型和宏观模型 .....	吴清松 姜锐 李晓白	(30)
多路径交通流模型——复杂适应系统 .....	许伯铭	(57)
交通流的建模和仿真 .....	戴世强 薛郁	(66)
一种交通流状态分析模型 .....	刘允才 郑兴宇	(126)
交通工程学中的交通流理论 .....	段进宇 缪立新	(136)
智能交通系统在我国的发展趋势 .....	刘允才	(155)
交通工程新技术概览 .....	段进宇 缪立新	(169)
颗粒物 .....	陆坤权 刘寄星	(174)
颗粒物质的流动行为 .....	陆坤权 厚美瑛	(192)
环境与二维颗粒流的研究 .....	张训生 鲍德松 胡国琦	(201)

# 交通流与颗粒流\*

陆坤权 张训生 缪立新 戴世强 陈叔平 鲍世宁 唐孝威\*\*

当前,社会经济的迅速发展与交通建设的相对滞后,已经构成非常突出的世界性矛盾。仅交通堵塞一项所造成的经济损失就十分惊人,美国德克萨斯运输研究所对美国 39 个主要城市的研究表明,美国每年因交通堵塞而造成的经济损失以千亿美元计,欧洲每年因交通拥挤和事故造成的经济损失为数千亿欧元。随着经济的发展,交通量的需求持续增加,尽管道路建设投入大量资金,城市及其周围修建了大量的交通设施,但是交通拥挤堵塞状况仍然十分严重。

多年来,国内外的实践证明,如果缺乏先进的理论指导,单纯依靠修建道路设施和采用传统的管理方式来解决交通问题,不仅成本昂贵,环境污染严重,且缓解交通拥挤等问题的效果也有限。我国在这方面的表现尤为突出,近几年来城市内部交通建设使情况有所改善,但交通仍不时发生堵塞,现有的交通资源又未获得充分利用。为了实现公路和城市交通的畅通,发达国家分别采用了高科技投入与多学科领域专家合作研究相结合的办法,设计建造与其国情相适应的科学的交通系统。例如美国在 20 世纪 90 年代后研究的智能运输系统(Intelligent Transport System, ITS),德国启用的高级运输信息与管理(ATTS/ATMS)等。我国已成为 WTO 正式成员,正面临经济大发展,改善运输系统和建立先进的交通信息管理系统迫在眉睫。

交通运输系统是否现代化、交通管理是否先进,是衡量一个国家现代化程度的重要标志。例如,20 世纪 90 年代,美国和德国每年在交通和通讯上的耗费已经分别占国民生产总值的 14.8% 和 13.7%。就一个城市来说,交通是否保持畅通,对其经济繁荣、市民生活水平甚至国际声誉都有着至关重要的影响。仅以奥运会为例,1996 年奥运会举办城市——亚特兰大市正是因为交通堵塞的状况,形象大损;与之相反,2000 年悉尼奥运会的成功举办,前奥运会主席萨马兰奇指出交通通畅是重要的因素。北京的交通情况比悉尼复杂得多,2008 年北京奥运会要成功举办,交通问题是必须考虑的首要问题之一。

交通问题与全球关注的环境问题密切相关。目前世界十大污染城市中,我国就占四个,分别是北京、上海、广州、沈阳,我国其他城市的污染也相当严重。其中大气污染

\* 本文以作者合写的建议书为基础重写而成。有关文献请在后面其他相关文章中查阅。

\*\* 本书作者单位参见作者名单。

物主要有悬浮颗粒物、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$  等气体。城市交通是这些污染物的主要排放源之一,其排放量在有的地方已超过了工业排放对大气的污染。由于机动车排污是低空排放,对人体健康的危害更大。欧洲每年因交通对环境污染造成的损失约千亿欧元。由于交通拥堵,汽车怠车状态所释放的废气是行车时的十多倍以上,更加剧了这种污染。因此,美国已经提出,交通部门制定计划时,必须受“清洁空气法案”和“地面允许运输及效率法案”的严格限制。

交通系统具有复杂性、动态性和随机性等特点。由于各国国情不同,交通系统特点也不同。交通流理论作为一项数学、力学、物理、信息科学和交通工程等研究领域的跨学科基础研究,通过实地观察和理论模型,分析车辆流在各种条件影响下出现的不同交通状态的规律。诸如交通堵塞形成机理、交通堵塞波的传播,以及保持交通畅通、防止或消除交通堵塞的途径等,为原有交通设施能力的充分利用,新的交通道路和设施的设计规划,以及交通系统的控制、管理提供必要的理论依据。

先进的交通流理论的应用及先进的交通工程与技术可以产生重大的经济效应。例如 20 世纪 90 年代,纽约市政府原拟修建通往新泽西的新隧道,但经过合理的交通流建模和分析,调整了交通控制和管理系统,使交通量增加 20%,缓解了交通压力,取消了新隧道的修建。再如,我国的一些高架桥和高速公路实际的通行能力只达到设计通行能力的一半或更低,造成巨大浪费。究其原因,在规划设计和交通控制、管理中缺乏适合国情的现代交通流理论的指导是一个关键因素。

我国的交通系统(尤其是大中城市的交通系统),具有平面、混合、低速的特征,行人、非机动车与机动车的混合,呈现多干扰的紊乱特征。照搬国外的交通流模型往往不能适应我国交通发展需要,而目前我国交通界大多沿用经典的交通流理论,难以正确解决问题。因此,根据我国实际情况探索自己的交通流理论模型并应用到实践中去,是一个亟待解决的重大课题。

从国外研究的情况来看,交通流问题的研究是伴随着汽车工业的发展和私人汽车的普及在发达国家开展起来的。20 世纪 30 年代,国外就有人用概率论方法研究交通流问题;50 年代,著名的流体力学和物理学家 Lighthill、Whitham、Pipes 和 Prigogine 等人提出交通流的运动学模型、跟车模型和动力学模型;70 年代,一些著名的物理学家如 Herman、Kadanoff 等投入交通流研究,并与应用数学家、交通工程专家合作,通过观测和试验研究,建立起当时急需的道路通行能力估计、交叉口交通信号配时理论,并初步建立起网络交通需求预测的理论,出现了 FREFLO, KRONOS, SCATS, SCOOP 等交通分析和交通控制软件包。

20 世纪 90 年代后,由于可持续发展和信息社会的需求,在交通领域产生了许多新的课题和挑战。1994 年美国国家公路局斥资 6000 万支持了交通科研项目 TRANSIMS(Transportation Analysis and Simulation System)。由以 Nagel 为首的

美国 Los Alamos 国家实验室等部门的 10 余位物理学家、数学家和交通工程师共同承担,以改进的 NS(Nagel-Schreckenberg)元胞自动机交通流模型为工具,研制出 TRANSIMS 交通分析程序包(现已升级到 2.1 版本),并成功地应用于德克萨斯州的德达拉斯市和俄勒冈州的波特兰市的交通分析和规划;在德国,2000 年斯图加特大学理论物理研究所的 Helbing 等用改进的流体力学模型,研制出 MASTER(Macroscopic Simulation of Traffic to Enable Road Prediction)程序包,并对德国-荷兰的一条高速公路成功地进行了交通预测,预测与实测结果基本相符。调研表明,美、德、日等发达国家目前已掀起了交通流研究的热潮。参与研究的不但有交通科学家和交通工程师,而且大批物理学家、流体力学家、应用数学家、计算机科学家、系统工程专家等等;有关论文每年数以千计,刊登交通流资料的网站动辄以百兆计;国际智能运输系统(Intelligent Transport Systems, ITS)每年举办一届大会,活动也十分活跃。此外,“交通流和颗粒流”(Traffic Flow and Granular Flow)等系列的国际会议频繁召开。随着非线性科学和计算机技术的发展,交通流的相变、相共存、滞后和自组织临界现象也激发科学家们的广泛兴趣。

我国在 20 世纪 90 年代以前,同济大学、清华大学等单位有人对交通流做了少量的研究,着重于探索概率论和跟车模型。90 年代,在国家自然科学基金委员会的资助下,陆续有物理学界和力学界的人士投身于交通流的研究,先后承担了若干面上项目和一个重点项目。参加单位主要有中国科技大学、上海大学、同济大学、上海理工大学、广西师范大学和香港中文大学。最近中科院物理研究所、浙江大学的物理学家和应用数学家也展开了这方面研究。中国科技大学、上海大学、同济大学和香港中文大学等单位在元胞自动机模型、流体力学模型和跟车模型的研究中,取得了一批结果,开始进入国际研究行列。

交通流处理的对象是离散态物质。这是一个复杂的非线性体系,对这类物质的运动规律的描述,目前尚无成熟的理论,其相互作用、耗散、涨落及相变等,均有待深入认识。在物理方面可以用颗粒物质流(简称颗粒流)对交通流进行简化的实验和理论研究,以便了解其一般的规律。

颗粒流本身是一个非线性能量耗散系统,有着人们尚未了解的一些特性。它与自然环境中发生的现象,例如沙丘的移动、泥石流等以及工业生产中的某些现象(例如制药过程)等都有密切的关系。颗粒物质运动的复杂性早就引起科学家的兴趣,18 世纪就有人开始研究沙堆问题。而关于颗粒问题的现代科学研究是在法国科学家德热内(P. G. de Gennes)提议下真正开始的,尤其是对自组织现象深入的研究,以沙堆为例,引起了人们对颗粒物质研究的广泛兴趣,在 20 世纪末形成一个高潮,在“Science”、“Nature”和“Phys. Rev. Lett.”等杂志上不断有关于颗粒物质研究成果的文章发表,研究的成果也丰富多彩。

若要对颗粒物质的研究简单地分类,可以分为颗粒物质的静态性质和动态性质的研究。颗粒物质静态性质的研究,有关于堆积密度、颗粒受(静)力和沙堆的静止角等内容。在对颗粒物质堆积密度的研究中,与一般固体和液体不同的特点,是颗粒物质的堆积方式和其历史有关,有一个随机分布的范围,在外力作用下会发生由原来堆积很密变得稀疏些的体积膨胀效应以及粮仓效应。动态性质研究可分为在外力作用下产生的振动和定向流动。在外力作用振动下产生对流现象和斑图以及颗粒的分离,振动可以有垂直振动、水平振动和滚动多种方式。在定向流动中,有垂直流动、水平流动和倾斜流动等不同情况,还包括有其他外力(例如电场力等)的作用的影响。颗粒流动的研究与交通流的研究有着较为密切的关系。由于颗粒物质的复杂性,在理论研究中人们分别应用经典力学,包括牛顿力学、流体力学等和元胞自动机、蒙特卡洛数值模拟等方法进行探讨;实验上则应用包括正电子湮灭技术在内的各种手段。

我国颗粒物质研究工作开展得相对较晚。中科院物理所陆坤权研究组是最先开展这方面研究的。目前国内这方面的实验研究较多。从已发表的工作来看,中科院物理所和浙江大学物理系以颗粒动态流动为主做了一些工作,贵州大学物理系做了静摩擦力的一些工作,中国科技大学和中山大学等也做了相关的研究工作。因篇幅有限,各单位的实验工作不一一列举。在颗粒物质的理论研究方面,目前国内工作不太多,有待理论学家的进一步重视和研究。

# 交通流概论

段进宇 缪立新

## 1 交通工程绪论

### 1.1 交通的作用——因其重要所以影响巨大

广义地说,交通是指人、物以及思想、信息的地点间移动(communication)。一般把人和物的移动称为经典意义上的交通(transportation),而把思想、信息的传递称为通信(communication)。是否体现人的意志,是区分交通和自然界存在的空间移动的标准。

交通在社会经济方面发挥巨大的作用,仅对物流业来说,其在各国的 GDP 中所占比例就达到 10%~20%。如果考虑交通相关的建筑、能源和制造业,其在 GDP 中的比重将超过 50%。

交通具有促进城市化的作用。从人类文明史来说,城市的形成,发展到今天能够成为人类聚落的主要形式,交通都起了决定性作用。

交通还在社会文化形成和改变生活习惯方面发挥巨大作用,所谓大陆文化、海洋文化及汽车文化,都是围绕交通方式形成的。

交通对灾害救援和疏散具有关键作用,城市减灾防灾的大部分措施是围绕交通展开的。

交通对改变社会弱势群体的地位至关重要。现在的弱势群体受到的最不公平的待遇是在交通方面,而这方面的弱势也给这些群体的进步带来根本性的障碍。

交通设施应满足的条件:迅速性、安全性、经济性、舒适性、准确性、自由性、公平性。在我国,人们对前面四项性能要求有一定认识,但对后三项性能要求的认识相当不足。

### 1.2 交通工程学概念纵观

Henry Ford 于 1910 年进行 T 型轿车的开发,揭开了美国/世界汽车化的序幕。

1921 年,交通工程师(Traffic Engineer)作为政府工作人员出现,象征着交通工程的诞生。

试读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

1926年,哈佛大学率先创立了道路交通专业。

1930年,美国成立交通工程学会(Institute of Traffic Engineering),将交通工程定义为:“处理与人和物的安全、方便且经济的运输关系,同时处理道路、街道及其相关联的土地规划、路线几何设计和交通管理的工程学。”

1978年,交通工程学会更名为运输工程学会(Institute of Transportation Engineering),并定义运输工程为:“适用于所有交通工具的设施规划、机能设计,以及对管理手段和技术手段的科学运筹,实现人员和物资的运输安全、迅速、舒适、便利和经济,并且与环境协调。”相应的交通工程新定义更改为“处理道路、街道、高速公路及其网络、起终站点、相关联的土地使用、路线几何设计和交通管理,并处理与其他交通方式的关系。”

美国考虑的运输工程为运输规划和交通工程的合集,前者包括路网建设调查分析、交通需求预测分析、道路选线评价、高速公路交通控制和停车管理等;后者包括交叉口改良、道路线形设计、交通信号配时和交通流渠化等;但两者之间并无明确界限。

### 1.3 交通工程学的发展纵观

最初,交通工程着重研究特定路段、交叉口的通行能力决定方法和交通现象描述方法。从20世纪30年代后期开始的实验性研究,成果于1950年归纳为美国的《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual),对道路规划设计工作发挥了重要的指导作用。

从20世纪50年代起,开始使用模型研究通行能力,流体力学模型和车辆跟驰模型被建立和运用,同时,概率论与数理统计的概念和方法应用到了交通模型中,排队论也因此被用于描述交通流。至此,道路交通现象得到了相当现实的描述。

由于通行能力并不能全面地描述交通流的运行质量,服务水平(Level of Service)的概念在1965年版的《道路通行能力手册》中被正式引入。目前这一概念已经成为交通工程界最有力的工具之一。

通行能力的研究针对的是道路的特定路段,而许多交通问题是必须以道路网为研究对象的。1952年,J. G. Wardrop提出著名的两项交通流路网分配原则,形成了道路网络交通流理论的基础。1970年,相应的算法也被建立。网络交通模型现在已经成为交通工程学研究领域的基干之一。

20世纪50年代开始正规应用的城市交通控制信号系统,由点控到线控到面控(1959年在加拿大多伦多市首次实现),促成了网络交通流模型的研究和开发。60年代后期,英国的道路运输研究实验室(Transport and Road Research Laboratory)开发了建立在计算机程序基础上的TRANSYT(TRAFFIC Network Study Tools)模型。发展至今,实用的网络交通流模型几乎都是综合多种建模技术的混合模型,并且都建

立在计算机程序基础上。

美国 1952 年制定的交通调查法律要求对道路建设财政支出的妥当性进行论证,直接促成了面向网络交通的宏观性交通需求预测模型的建立和发展。经典的交通需求预测四阶段模型就是在随后的底特律和芝加哥交通大调查基础上发展起来的。

早期的交通需求预测中的底特律法、福雷特法、增长系数法、机会模型、引力模型、转换率曲线交通方式划分法属于经验方法;后来考虑因果关系的需求预测系统方法出现,如平衡理论在需求预测中的广泛应用;接下来交通活动的本质受到重视,以此为出发点的交通需求社会经济学预测模型和更进一步的社会系统动力学模型也被提出;另外,经典的交通模型把交通行为群体作为研究对象,以统计量描述交通系统,是一种集结模型(Concentration Model),新一代基于交通行为个体的非集结模型(Deconcentration Model)近来在迅速发展;随着 ITS 概念的提出和应用,动态化的交通需求预测模型成为当前的研究热点。

交通模型的发展趋势是:从经验法走向因果法,从片段模型走向系统模型,从宏观走向微观,从静态走向动态,从数学模型走向计算机模型,从单一模型走向复合模型。新方法的出现受相关领域新概念新技术的发展影响大,也同当时的社会需求联系密切。

#### 1.4 交通工程学定义

交通工程学是将人、车、路以及与此三者同时相关的环境因素综合在统一体系中进行研究。目的是提供更安全、经济、便捷和舒适的交通服务,同时维持社会的效率、公平、和睦和昌盛,减少对自然环境的危害。

从广义说:交通工程学不同于一般的工程学科,具有极强的综合性、社会性,需要高的文化素养和社会道德感;它综合了自然科学和社会科学、工程和艺术、理性和感性,涉及到规划/设计/营建和经济管理、地理和环境、生理和心理、历史和时尚、法规和ación;面对的问题不仅与车、路、设施、环境等物理因素有关,而且同驾驶员、乘客、行人的精神因素有关。

从狭义说:交通工程学是关于这样的交通系统的科学与工程学——A transportation system may be defined as consisting of the *fixed facilities*, the *flow entities*, and the *control system* that permit people and goods to overcome the friction of geographical space *efficiently* in order to *participate* in a *timely manner* in some *desired activity*.

#### 1.5 现代交通工程学在我国

现代交通工程学从发达国家到国内的传播始自 20 世纪 70 年代末,当时美籍华

裔学者张秋先生来华在四城市(北京、上海、天津、西安)访问讲学,可谓正式启动了国内交通工程学的研究。国内第一个交通工程学术团体是上海交通大学学会,第一个研究团体是同济大学交通工程教研室,当时的负责人是杨佩昆教授。到20世纪80年代中期,上述四个城市的正规交通工程研究与实践都已经初具规模。

从20世纪80年代中期开始,有组织的专业化交通调查开始在我国兴起,最初的工作是在天津市展开的。

随大规模交通调查而来的是城市交通规划和公路网规划在全国范围内的展开。20世纪90年代前半期,一时之间几乎所有的国内交通工程研究机构都卷入交通规划工作中。建设部与交通部的相关文件对这种局面的形成起了很大促进作用。

从20世纪90年代开始,公安部着手组织交通法规的创制和改进工作。目前我们应用的交通法规,全部是在这之后形成的。在此之前,我国的交通法规几乎处于空白状态。

20世纪80年代中后期,我国开始研究和应用网络化的城市交通监控系统。以北京、上海、沈阳等城市为典型,引进了当时世界上比较先进的区域交通监控系统,以杨佩昆教授为首的项目组还在南京开展了“七五”攻关,初步完成了我国首个自主研发的区域交通监控系统。

20世纪90年代以后,随着高速公路建设的全面展开,其相关的交通工程设施市场也被启动,这使得交通工程以少数专家学者为主的局面发生了变化,交通工程在我国首次被认同具有产业价值。

当前国内交通工程的几大热点是:交通基础设施建设评估、智能交通系统(Intelligent Transport Systems)事业在国内的日渐繁荣,公安部、建设部推出大城市“畅通工程”计划——催生了城市交通监控和交通系统管理在国内诸多城市的普遍开展。

## 1.6 交通工程学的性质和内容

交通工程学是一门综合性应用工程学科。它在社会科学领域的相关学科有:经济学、管理学、社会学、心理学、美学、法学、伦理学、教育学等;它在自然科学领域的相关学科有:应用数学(数学规划)、统计学、应用物理学(运动学、动力学)、土木建筑工程学、系统工程与自动控制、预测学、计算机与信息学。

目前国内比较公认的交通工程研究内容包括以下方面:人、车、路交通特性,交通流理论与建模,交通调查与分析,交通预测与交通规划,交通监控,交通设计,交通管理,交通影响评价,物流运输管理,交通设施/设备(交通枢纽、停车场/库、服务设施、安全设施、信号灯、标志标线),交通法规与教育,交通事故,运输体系和交通环境等。

## 2 交通流最基本的特征

车辆群体在道路上行驶形成的交通状态,称为交通流。交通流具有个别行驶车辆所不具有的类似流体的特性,也因此引出了描述这种特性的交通流特征参数及其相互之间关系的问题。

交通流量(traffic volume)、交通流平均速度(mean speed)、交通流密度(density)为描述交通流特性的三大基本参数。有时,交通占有率(occupation)的概念在交通监控领域中取代交通密度,原因是它可以被检测设备直接识别。

### 2.1 流量的物理定义

指单位时间内通过道路某横断面的车辆数。

### 2.2 交通工程中的流量

交通工程实践中,因为用途的不同而指定的单位时间不同,因此派生出不同的流量定义。其中比较典型的有:

1. 年交通量,衡量地区交通需求增长和经济发展情况;
2. 季交通量,考察季节变化对交通和社会、经济活动的影响;
3. 月/周交通量,考察更具体的原因对交通和社会、经济活动的影响;

(以上这些交通量定义通常与较大地域范围联系起来)

4. 日交通量,常用于规划目的;
5. 16/12/小时交通量,用于规划和交通量观测目的;

6. 小时交通量,包括高峰小时交通量、日第4高位小时交通量等,广泛用于交通需求水平的描述;

7. 交通流率(flow rate),15/30/60秒/5/10/15分钟流率,常用于交通监控目的。

8. 实践中常用的还有:年/季/月/周平均日交通量、年/季/月/周平均(高峰)小时交通量、年第30高位小时交通量;

9. 通行能力,一般用小时交通量表示,或换算为小时交通量。

### 2.3 平均速度的物理定义

平均速度实际上分为时间平均速度和空间平均速度。

时间平均速度(time mean speed)——某点上一定时间内的地点车速的平均值。

空间平均速度(space mean speed)——特定区间内某时刻的地点车速的平均值。

时间平均速度和空间平均速度两者的关系如下：

忽略加速度，考虑单位时间内在某一区间内的车辆在单位时间内可以通过下游结束点的车辆，本身速度越高的通过得越多，因此  $f_t(v) = cvf_s(v)$ 。再考虑当所有车辆速度相等时（这时  $\forall v, v = \bar{v}_s$ ），有  $f_t(v) = f_s(v)$ ，得到  $c = 1/\bar{v}_s$ ，则

$$\bar{v}_t = \int_0^{\infty} v f_t(v) dv = \frac{1}{\bar{v}_s} \int_0^{\infty} v^2 f_s(v) dv = \frac{1}{\bar{v}_s} (\sigma_s^2 + \bar{v}_s^2) = \bar{v}_s + \frac{1}{\bar{v}_s} \sigma_s^2$$

因此，在可比性的情况存在下，时间平均速度比空间平均速度大，而空间速度越集中，就越接近时间平均速度。

另外， $\bar{v}_s = 1 / \int_0^{\infty} \frac{1}{v} f_t(v) dv$ ，表明空间平均速度是时间平均速度的调和平均，这提供了通过观测地点车速的时间分布情况来间接计算空间平均速度的方法； $\int_{\bar{v}_s}^{\bar{v}} f(v|\bar{v}_s) dv = \int_{\bar{v}_s}^{\infty} f(v|\bar{v}_s) dv$ ，表明车流中以空间平均速度行驶的车辆，其超车次数与被车超车次数相等，这提供了用浮动车法测量空间平均速度的方法。

## 2.4 交通工程中的平均速度

在交通工程实践中，时间平均速度比较易于量测，可使用雷达测速仪、定距短基线测时等方法进行。

设备要求最低的定距短基线测时方法目前实用性最高，考虑人的反应准确性，推荐的人工计时所用基线长度为：车流速度小于 40km/h 时可用 25~30m；40~70 km/h 时可用 50~60m；大于 80km/h 时可用不小于 80m。

空间平均速度不易量测，经典的方法是使用高空连续摄影。尽管可实施性不佳，但理论价值较高。

交通工程实践中常用到以下平均车速的概念：

1. 行程速度 (travel/journey speed) 用于需要评估服务水平的所有场合，行驶速度 (spot speed) 主要用于交通事故研究；
2. 运营车速 (operation speed)，运输企业的客货车辆在运输线路上的周转车速；
3. 运行车速 (operation speed)，一般驾驶员在良好天气条件下可以安全行驶的最高行程车速；
4. 设计车速 (design speed)，在交通规划、路线设计、交通管理中的控制速度；
5. 临界速度 (critical speed)，道路交通量达到通行能力时的平均车速。

## 2.5 密度的物理定义

交通流的密度是指单位长度道路上某瞬间存在的车辆数。

## 2.6 交通工程中的密度

在交通工程实践中,密度是表现道路交通拥挤状况的最适当指标。美国《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual)中就用密度作为路段服务水平的描述指标。

然而密度存在测量困难的问题,因此很多时候引入(时间)占有率指标来代替密度。理论分析表明,时间占有率同密度成正比,实验测试也证明了这一点,只是车辆长度和车速的不同组合会影响其中的比例因子。

密度(density)与集度(concentration)的概念有所区别,前者通常指较长基线上的密度,后者通常指较短基线上的密度,类似于 volume 和 flow rate 之间的关系。

## 2.7 流量、平均速度、密度之间的关系(理论)

设想将交通流分为流量为  $q_1, q_2, \dots, q_c$ , 速度为  $v_1, v_2, \dots, v_c$  的均一化支流,则  $Q = \sum_{i=1}^c q_i$ 。就速度为  $v_i$  的支流  $q_i$  而言,其车辆间平均时间间隔为  $1/q_i$ ,在此时间间隔内行驶的距离为  $v_i/q_i$ 。则根据密度  $k_i$  的定义,不难得到  $k_i = q_i/v_i$ 。

又可知 
$$K = \sum_{i=1}^c k_i$$

因为空间平均速度  $\bar{v}_s = \sum_{i=1}^c k_i v_i / K$ , 所以  $\bar{v}_s = \sum_{i=1}^c q_i / K = Q/K$ , 这就是所谓的交通流基本关系式。

另一方面,经验表明,车速  $v$  和密度  $K$  之间存在明确的反比关系,这也符合驾驶员的心理预期。 $Q = Kv$  加上  $K-v$  关系式可以构成完整的  $Q-K-v$  关系体系,这个关系体系如果用坐标图的方式表现出来,则被称为交通流基本图示(Traffic Flow Fundamental Diagram)。

以下的  $v_0, k_0$  表示临界车速(critical speed)和临界密度(critical density),  $v_f, k_j$  表示自由车速(free speed)和阻塞密度(jam density)。

B. D. Greenshields 在研究美国公路交通流时首先通过实测揭示了第一个  $K-v$  关系式  $v = v_f(1 - k/k_j)$  (图 1)。

相应地,  $q = v_f k - (v_f/k_j)k^2$ ,  $q = k_j v - (k_j/v_f)v^2$ , 对两式求微分再作变换可得到  $\frac{dq}{dk} = v_f - 2\left(\frac{v_f}{k_j}\right)k$  和  $\frac{dq}{dv} = k_j = 2\left(\frac{k_j}{v_f}\right)v$ 。

则可得  $k_0 = k_j/2$  和  $v_0 = v_f/2$ , 表示在 Greenshields 的  $K-v$  关系中,流量最大时的密度(即所谓临界密度)为阻塞密度的一半,而流量最大时的平均速度(即所谓临界车速)为自由车速的一半。