

城市交通拥挤牵制控制与 边界控制集成策略研究

马亚锋 著



非
外
借



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

城市交通拥挤牵制控制与边界控制集成策略研究 /
马亚锋著. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.11
ISBN 978-7-5643-8389-3

I. ①城… II. ①马… III. ①城市交通 - 交通拥挤 -
交通运输管理 - 研究 - 中国 IV. ①U491.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 232662 号

Chengshi Jiaotong Yongji Qianzhi Kongzhi yu Bianjie Kongzhi Jicheng Celue Yanjiu
城市交通拥挤牵制控制与边界控制集成策略研究

马亚锋 / 著

责任编辑 / 宋浩田

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印张 15 字数 215 千

版次 2021 年 11 月第 1 版 印次 2021 年 11 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8389-3

定价 68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

PREFACE

随着城市化进程的加快和机动车保有量的快速增长，交通需求与供给之间的矛盾日益突出，道路交通系统面临的压力愈来愈大，交通拥挤在中国各个城市愈演愈烈，并逐渐成为困扰和限制城市可持续发展的主要因素之一。交通拥挤不但会降低交通系统的服务水平，增加出行过程中的交通延误，导致交通事故的频繁发生，而且低效的交通运行还会导致能源浪费和环境污染，降低城市居民的幸福指数。

对交通拥挤进行准确地测度和有效地控制，是解决交通拥挤问题的重点和难点。本书在总结了已有的交通拥挤机理分析、拥挤测度和控制相关研究的基础之上，从区段上具有匹配关系的驶入驶出流率的角度出发，对交通拥挤进行了重新定义。首先，本书研究了由驶入驶出流率衍生的累积流量的变化与交通拥挤的形成、发展、消散过程之间的关系，依次分析了基本计算单元、城市道路基本路段、交叉口以及城市交通网络的拥挤机理。然后，本书建立了基于累积流量比的交通拥挤测度模型，通过应用粗糙集理论模型，对交通拥挤度进行了区间划分，实现了多等级道路交通拥挤的统一度量并将其推广到区域交通网络。最后，在交通拥挤测度理论的基础上，提出了多种交通控制策略。针对城市交通干线局部拥挤条件下的交通控制与疏导问题，提出了绿波带与红波带协调控制策略；针对城市交通网络局部拥挤条件下的交通控制问题，建立了基于度相关性的网络交通拥挤牵制控制模型，并给出了对应的求解算法及流程；针对大型城市交通网络多点拥挤问题，建立了城市交通网络多子区最优边界控制模型，并提出了子区边界交叉口信号配时参数优化方法。

本书的出版旨在为城市交通拥堵测度提供一种新的思路，并总结交

通拥堵控制领域的相关理论及研究成果，为稳定、可靠的城市交通系统网络控制提供理论依据和方法支撑。本书可作为交通工程、交通运输规划等专业的本科生和交通信息工程及控制、交通运输规划与管理、交通系统工程等专业硕士研究生、博士研究生的参考用书，也可供从事交通信息工程与控制、交通运输规划与管理、交通运输系统、智能交通系统等领域的科技工作者、管理人员参考。

本书的完成得益于教育部人文社会科学研究青年基金项目（编号：19YJC630121）、国家自然科学基金面上项目（编号：61873216）、国家自然科学基金青年科学基金项目（编号：52002127）、江西省教育厅科技技术研究项目青年项目（编号：GJJ200669）的资助，在此一并表示感谢。

本书在成书过程中广泛借鉴了国内外部分有代表性的文献和资料，已将其列在参考文献中，在此向相关学者和研究机构表示诚挚的感谢！

由于作者学识有限，书中难免有认识不足或错漏之处，恳请各位专家、同仁和广大读者批评、指正。

马亚锋

2021年7月于华东交通大学

目录

CONTENTS

第1章 绪论	001
1.1 研究背景	002
1.2 交通拥挤国内外研究现状	004
1.3 交通拥挤测度与控制研究现状评述	018
1.4 主要研究内容及意义	020
1.5 本章小结	022
第2章 城市交通拥挤机理分析	025
2.1 交通拥挤概述	026
2.2 城市交通拥挤特征分析	029
2.3 城市交通拥挤机理分析	034
2.4 基于累积流量的交通拥挤测度的可行性分析	048
2.5 本章小结	059
第3章 交通拥挤测度理论研究	061
3.1 基于累积流量比的交通拥挤测度理论	062
3.2 路段交通拥挤测度	063
3.3 交叉口交通拥挤测度	072
3.4 基于粗糙集的交通拥挤区间细分	073
3.5 本章小结	093
第4章 基于累积流量比里程分布的网络交通拥挤测度	095
4.1 城市网络交通拥挤	096
4.2 基于累积流量比里程分布的网络交通拥挤测度	100

4.3	实例仿真与分析	108
4.4	本章小结	113
第 5 章	干线局部拥挤的绿波带与红波带协调控制	115
5.1	绿波带与红波带协调控制原理与实施流程	117
5.2	协调控制范围分析	120
5.3	协调控制策略及方案设计	121
5.4	实例分析	125
5.5	本章小结	128
第 6 章	基于度相关性的网络交通拥挤控制	129
6.1	城市交通网络的拓扑结构	130
6.2	城市网络交通流运行分析	137
6.3	基于度相关性的网络交通拥挤控制	143
6.4	实验分析	151
6.5	本章小结	158
第 7 章	交通网络多子区最优边界控制	159
7.1	宏观基本图理论	160
7.2	网络交通流平衡模型	161
7.3	多子区网络最优边界控制模型	164
7.4	边界交叉口信号控制方法	167
7.5	案例分析	170
7.6	本章小结	176
第 8 章	总结与展望	177
参考文献		183
附录	控制方案程序	197

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

世界范围内的城市化进程正在逐步加快,据统计,从1990年至2014年的25年间,全世界的城市化人口数已从22.58亿增长至38.62亿,年平均增长率为2.1%。而中国作为最近三十年全世界发展最快的国家,其城市化人口数也从3亿增长至7.42亿,年平均增长率达3.7%,远超过世界平均水平^[1]。伴随着城市化人口数量的增加,机动车保有量也呈现出快速增长的趋势,2014年,全球的机动车销量已超过8500万辆,而其中仅中国就超过1500万辆;据IHS Automotive估计,全球机动车销量在2018年突破1亿辆^[2]。机动车保有量的持续增加,一方面极大地方便了居民的出行,改善了国民的生活质量,促进了区域的经济发展和进步;另一方面,也导致了居民出行需求的飞速增长,从而使得交通需求与供给之间的矛盾日益突出,道路系统面临的交通压力愈来愈大,并引发了交通拥挤现象的产生。近年来,交通拥挤现象在中国各大中型城市愈演愈烈,已逐渐成为限制其可持续发展的重要因素。

交通拥挤不但降低了交通系统的服务水平,增加了出行过程中的交通延误,导致了交通事故频繁发生,而且低效的交通运行也导致了能源浪费和环境污染,降低了城市居民的幸福指数。其主要表现如下。

(1) 巨大的经济损失。

据有关部门的统计分析数据,2002年至2012年全国因交通拥挤导致的经济损失从2000亿元增长至18700亿元,从占全年GDP的1.7%增长至3.5%,侧面反映了我国交通状况日益恶化。另外,依据美国交通运输部的资料,美国每年由于交通拥挤引发的时间延误高达50亿小时,每年由其带来的直接经济损失超过1000亿美元。日本东京每年由于交通拥挤导致的时间损失相当于123000亿日元(1160亿美元),欧洲每年因交通拥挤造成的经济损失保守估计达5000亿欧元^[3]。

(2) 严重的环境污染。

交通拥挤会引起车辆在行驶过程中进行频繁的减速和加速,一方面,车辆的速度降低导致交通运输效率低下,另一方面,车辆的低速行驶会

额外消耗大量能源，同时排放更多的废气，加上交通噪声，这两大交通污染源已逐步取代传统工业排污成为大中型城市的主要污染源。以北京市为例，来自机动车排放的 NO_x 和 CO 在污染源中的比例高达 46% 和 63%，而上海早在 1996 年机动车排放的 CO 已占到总 CO 排放的 61%^[4]。项乔君、张金武等的研究还表明，机动车在低速行驶时的燃料消耗是高速行驶时的 2 倍，同时污染物排放是高速时的 2~4 倍。特别是阻塞交通流条件下，汽车的污染排放是正常行驶的 6 倍，所以交通拥挤必然带来严重的环境污染^[5,6]。

（3）更高的交通事故率。

交通事故容易引发局部的交通拥挤，而交通拥挤条件下，车辆被动缓行，互相之间约束较强，走走停停也容易引发交通事故。2014 年，全国共发生交通事故 196 812 起，造成 58 523 人死亡，211 882 人受伤，直接经济损失达 10.75 亿元。研究表明，其中由于交通拥挤引发的交通事故共 73 608 起，占比 37.4%，造成人员伤亡事故的占比 36.6%^[7]。此外，丁靖艳、李卞楠等的研究表明，在交通拥挤条件下，驾驶员会产生烦躁、紧张、疲惫等消极心理，这些消极心理容易导致驾驶员做出不安全的驾驶行为，从而引发交通事故^[8-10]。

所以，交通拥挤已成为制约世界各国大中型城市发展的一个关键因素，能否很好地解决这一问题，一方面直接关系到人们日常交通出行质量的高低，另一方面也关系到城市能否可持续发展。城市交通系统是一个高维、复杂的巨系统，虽然其中的交通拥挤问题会随着城市机动车保有量规模、城市路网规划布局、城市交通控制方式的不同而有所差异，但是交通拥挤的产生机理和解决思路却基本相同。城市交通拥挤是城市交通系统内部矛盾的综合反映，是由于城市交通系统供给无法满足居民出行需求而引发的。其外在表现为大量交通工具及出行者在路网上的部分节点或部分路段上被动缓行、走走停停，甚至出现完全停车排队等交通现象。这些交通现象的产生一方面说明拥挤的交叉口和路段已处于满负荷或接近满负荷状态，另一方面也说明出行需求在路网上的分布是不

均衡的。要解决这一难题,首先,要对城市交通拥挤的发生—发展—蔓延—消散机理作出深入的分析和研究;其次,要开发出一种合乎拥挤形成过程的测度理论,可以分别从节点、路段和路网三个层面度量交通拥挤的严重程度;最后,要开发出一种可以依据拥挤严重程度做出快速反应的交通拥挤控制系统,使得城市路网上的交通分布均衡化,缓解局部交通拥挤的同时,提高整个交通网络的可靠性。

1.2 交通拥挤国内外研究现状

从交通拥挤现象产生开始,国内外的学者就从各方面开始对其进行探索和研究,主要包括交通拥挤的定义、形成机理、严重程度测度以及管理控制方法等方面的内容。由于国外城市化进程起步早,城市化程度高,交通拥挤问题也早在 20 世纪 60 年代已开始出现,国外学者的研究也随之展开并取得了很多研究成果,但是由于国外的城市规模普遍较小,城际交通线路比较发达,故而对交通拥挤的研究主要集中在高速公路和公路上。改革开放以来,我国经济快速发展,城市化进程逐步加快,城市机动化程度逐渐提高,城市交通拥挤问题也逐渐显现并越来越严重。国内学者也对其进行了深入分析,研究了交通拥挤的发生、发展和消散过程,并取得了很多研究成果。

1.2.1 交通拥挤的形成机理研究

在交通拥挤的形成与传播机理的研究中,不少学者针对不同的城市及其交通拥挤的特点,提出了针对性的交通拥挤缓解方法^[11-18]。但是总体看来,这些方法大多比较注重实际交通实践,缺乏对交通拥挤的形成与传播机理的规律的研究,从而使其在实际交通拥挤管理与控制中存在很大的局限性。进行交通拥挤形成与传播规律、消散与控制策略领域的研究,是后续城市交通拥挤管理与控制的理论基础,对保证城市交通效率的提升具有非常重要的意义。目前,交通拥挤形成机理的研究主要集

中在微观的车辆交通流理论、中观的路段交通流理论和宏观的交通供需平衡理论三个方面。

1.2.1.1 微观车辆交通流理论方面

微观车辆交通流理论的研究内容是单个交通参与者的交通属性，现阶段的研究主要在跟驰理论和元胞自动机模型理论两个方面展开。跟驰理论由 Pipes 于 1967 年在其发表的汽车跟驰模型及道路交通基本图论文中提出，主要采用刺激-反应模式，以刻画车队中后车对前车跟随过程中发生的各种现象^[19]。章三乐等通过对同一车道上行驶的一队车辆的跟驰行为的分析，建立了车队通过信号控制交叉口的数学模型，通过车队中车辆在任一时刻的位置、速度反映车流交通状态^[20]。韩祥临等在智能交通诱导信息基础上，提出了一种改进的耦合映射跟驰模型，再现了单车道的交通拥挤的形成与消散过程，并对拥挤控制进行了研究^[21,22]。周桐认为在实际的交通运行中，后车的车速调节不仅与车头间距有关，也与驾驶员预估的车头间距有关，并据此提出了一个考虑预估车头间距的跟驰模型，描述了预估驾驶行为下交通拥挤的演化规律^[23,24]。

元胞自动机模型是一种数学模型，其实质是将网络分为离散的、具有有限状态的元胞空间，然后按照一定的规则，在时间维度上对各元胞空间进行状态推演的动力学系统。Nagel 和 Schreckenberg 将其应用于交通系统，通过加速、减速、随机慢化、位置更新的并行更新规则，可以描述自发产生的堵塞现象以及拥挤交通情况下的时走时停波等，此即著名的 NaSch 模型^[25]。随后，在 NaSch 模型的基础上，为了描述静止车辆的启动过程，Takayasu 等提出了慢启动模型^[26]。为了将前车效应考虑进来，唐智权等提出了多级速度效应模型^[27]。Knosp 等考虑了驾驶员驾驶过程的舒适性，为避免加、减速度过大引起的不适，提出了舒适驾驶模型^[28]。景婷在舒适驾驶模型的基础上，基于安全驾驶规则，以车辆前方一定范围内密度为依据，设计了新的模型演化规则，提出了改进的 NaSch 模型^[29]。高坤利用交通流元胞自动机模型，再现了堵塞集团中车辆的慢启动行为，模拟出了拥挤过车中的交通迟滞现象、交通亚稳态和交通相

分离现象^[30]。李启朗通过构建十字路口交通流模型的相图，研究了路口瓶颈处的交通状态的变化过程^[31]。张晨琛等研究了高速公路主线收费站的交通拥挤的形成及消散控制策略^[32]。吴义虎等以元胞自动机模型为基础，建立了描述城市道路偶发性交通拥挤的改进模型，并分析了偶发性交通拥挤条件下的车辆排队和平均速度变化情况^[33,34]。王兵兵通过分析交通事故发生地点的时空分布对城市路网的影响，分析了城市道路交通拥挤的发生-消散机理和传播特征^[35]。孔琳鹏通过双车道和多车道元胞自动机模型，研究了事故条件下城市快速路交通拥挤的形成机理和演化过程^[36]。

1.2.1.2 中观路段交通流理论方面

中观路段交通流理论的研究内容是路段或交叉口上的车队的交通属性，主要包括以 Green Shields 速度-密度模型为代表的传统交通流模型和交通波理论。传统交通流模型通常通过交通量、速度、密度等参数来描述交通流特性，也形成了具有代表性的路段基本图理论。该理论假设路段流量与速度、密度之间存在严格的单值对应关系，并通过阈值法将交通状态划分为拥挤和非拥挤两种交通状态，即超过某一阈值密度（或低于某一阈值速度），即认为发生了交通拥挤。这方面的研究产生了许多经典的交通拥挤判别算法，如 California 算法、McMaster 算法、指数平滑法和标准偏差法等^[37]。这些算法在实际中已得到广泛的应用，并取得了良好的效果，但是由于这些方法无法鉴别交通拥挤的发生过程，也不能判断交通的变化趋势，在长直且侧向干扰较少的公路上尚可应用，而在复杂且相互交错、相互影响的城市交通网络中的应用效果则会大打折扣，误报率较高。同时，简单地将交通流状态划分为拥挤和非拥挤两种状态，与实际观测也不太相符。Kerner 在分析了大量的高速公路实测数据后，提出了三相交通流理论，即交通流可以定性地被划分为自由流、同步流和移动阻塞流三种相态，拥挤发生于同步流与移动阻塞流的相态转化阶段，但是其研究中没有给出相态转化的临界条件^[38]。王子雷等应用实测数据，对城市主干路基本路段的交通流进行了分析，验证了三相交通流

的存在,并确定了各相位的关键阈值^[39,40]。董春娇认为高速公路和城市快速路之间具有不可忽视的差异,依据城市快速路的实测交通数据,采用线性回归分别建立了城市快速路交通流率-速度和速度-占有率模型,对城市快速路交通流进行了状态划分^[41]。

1955年,流体力学专家 Lighthill 和 Whitham 将流体动力学引入交通流的研究中,提出了可以描述公路上交通流运动的一维波动学理论,次年, Richards 经过独立研究,也提出了相似的交通流理论,宣告了经典交通波动理论的诞生^[42,43]。后续学者将其用于交通拥挤的研究,分析了拥挤条件下交通波的时空变化规律,并建立了相应的交通波模型,将交通拥挤的形成—发展—消散过程视为交通冲击波在道路上的传播。Mun 应用交通波理论描述了高速公路收费站的交通拥挤的形成和发展过程^[44]。杨少辉将交通波理论引入快速路系统交通瓶颈的研究中,分析了交通瓶颈处的交通拥挤的形成、扩散和消散机理^[37]。任作武等将其引入高速公路瓶颈中,分析了重载车辆在瓶颈路段的拥挤形成-消散过程^[45]。孙勇建立了基于车辆运动学的改进启动波和停车波模型,对干道的交通拥挤形成机理进行了研究^[46]。蔡晓禹等采用交通波理论,分析了不同背景交通状况和事故严重程度下,事故对宏观交通状态的影响机理以及相关交通流参数的时空变化特征^[47]。赵寿根研究了路段上的事故发生地点对交通冲击波和稀疏波的影响^[48]。陈诚、余贵珍等研究了高速公路基本路段上交通事故发生地点上游交通拥挤的发生和消散过程^[49, 50]。马江平研究了城市交通系统中的交通事故后路段和相邻路段的拥挤集结及消散过程^[51]。张晓燕研究了交通事件下的交通拥挤波的形成与传递,建立了交通事件下快速路交通拥挤的传播与蔓延模型^[52]。陈晓明利用概率、交通波、间隙接受等理论,分析了混合交通条件下的城市道路信号交叉口的交通拥挤形成与消散过程^[53]。曹宝贵基于交通波理论,分析了常发性交通拥挤和偶发性交通拥挤的形成、发展和演变规律^[54]。王殿海等通过研究交叉口的启动波和停车波,划分了车辆在信号控制下的拥挤形成、消散模式,得出路段行程时间不仅随着路段流量的增加而增长,也与控制信号有关^[55]的结论。

1.2.1.3 宏观网络交通流理论方面

交通供需平衡理论是在网络宏观层面研究交通拥挤的产生与传播规律的基础理论。Wardrop 于 1952 年提出了网络交通平衡的概念,并分别从交通出行者和管理者的角度对其进行了分析和研究,从而形成了第一平衡原理[即用户均衡(UE)]^[56]和第二平衡原理[系统最优(SO)]^[57],但是在很长一段时间内,其建模和求解方面的问题一直困扰着所有的研究者。直至 Beckmann 建立了路径流量和 OD 对流量之间的对应关系,提出了满足 Wardrop 第一原理的数学规划模型,才奠定了网络交通流分配及供需平衡分析的基础^[58]。为了对 Beckmann 的数学模型进行求解,Leblanc 引入了 Frank-Wolfe 算法,使得网络交通配流取得了长足的发展^[59]。依据主流的交通拥挤的定义,交通需求超过供给即会形成交通拥挤,Lomax 和 Szeto 将道路交通流理论引入到网络交通流的研究中,分析了拥挤网络中的车辆排队,再现了网络交通拥挤的形成-消散过程^[60,61]。将道路交通流理论与网络交通流理论相结合,一方面可以通过道路交通流理论描述网络局部拥挤的发生和蔓延过程,反映拥挤的动态运动特性;另一方面可以通过网络交通流理论刻画出行者的交通行为,真实地反映出行者的路径选择行为与拥挤的传播动态之间的互相作用。现阶段网络交通拥挤模型的构建方法主要有两种:解析法和仿真法。Carey 等引入运动波理论,建立了交通流动力学模型,以描述交通拥挤在局部路网的形成与扩散过程^[62]。Wright 等通过简化网络的交通流特性,建立了事故条件下的静态网络中的交通拥挤传播解析模型^[63]。Nagatani 等通过计算机仿真发现,即使全网的车流密度很低,局部密度过高也会引发交通拥挤,并且会逐渐由一个街道向全网蔓延^[64]。Roberg 等通过计算机仿真,研究了同质交通流条件下的局部交通拥挤的形成过程^[65]。随后, Naganani 等基于二维和多维元胞自动机模型,研究模拟了城市交通网络上车流从自由流到拥挤状态的转变过程^[66-70]。龙建成基于改进的元胞传输模型(CTM),构建了动态交通流传播模型,并模拟了突发事件下交通拥堵的传播规律^[71]。何树林认为造成城市交通拥挤的根本原因是交通需求与供

给的严重失衡,他运用网络供需平衡理论分析了城市交通拥挤的形成机理^[72]。总体来说,解析法受限于比较严格的假设条件,在模型中对实际交通状况进行大规模简化,无法真实地反映交通拥挤形成-消散的动态过程;相对而言,仿真法可以通过对模型形式和参数的调节来更好地反映实际交通环境的变化,从而真实地反映交通拥挤的动态过程。同时,李林波等从时间维度研究了我国城市交通拥挤演变发展的一般规律,并从社会范畴的角度提出了一些缓解交通拥挤的对策^[73]。吴兵等认为交通需求是一种衍生需求,并将其分为弹性需求和非弹性需求,然后从进化动态博弈理论的角度进行分析,得出拥挤博弈可以收敛于唯一的纳什均衡点,利用合理的可变价格方案可以使交通出行实现社会最优^[74-75]。

1.2.2 交通拥挤测度研究

交通拥挤测度的目的是考察和研究各项交通流参数在不同的交通状态时的特性及决策点,以求对交通拥挤的发生、发展及其严重程度做出精确的描述和量化分析,为交通拥挤的管理与控制提供准确的基础信息。在交通拥挤测度中,依据在研究过程中采用的方法的复杂程度,可以将其划分为直观性方法和复合性方法。

1.2.2.1 直观性方法

所谓直观性方法,即指用直接可以检测的或经简单运算即可获取的交通参数,如交通量、速度、占有率、排队长度、饱和度(交通量与通行能力之比)等指标来衡量交通拥挤及其严重程度。这方面的研究主要集中于各国交通运输管理部门的技术规范中,并已形成一套完备的判别和处理体系。美国加利福尼亚州交通局规定在高速公路上平均速度低于 35 mile/h(即 56 km/h)且持续时间在 15 min 及以上即是交通拥挤^[76];明尼苏达州规定高速公路的运行速度在 45 km/h 以下即为拥挤^[77];密歇根州规定服务水平为 F 级,即饱和度接近于或者超过 1 时,就发生了交通拥挤^[78]。韩国公路管理局规定速度在 30 km/h 以下的车流为拥挤车流,

并认为一个月内持续 2 h 以上、拥挤发生 10 次以上的即为常发性交通拥挤^[79]。日本规定道路运行速度 40 km/h 以下，或拥挤长度超过 1 km，或拥挤时间超过 10 min 的为交通拥挤。我国《城市道路交通管理评价指标体系（2007 版）》中也依据行驶速度对高峰时段城市道路路段的拥挤程度进行了分级，如表 1-1 所示^[80]。

表 1-1 城市道路交通状态分级表

单位: km/h

评价标准等级	顺畅	普通拥挤	严重拥挤
特大型和 A 类城市（速度）	[22, 60]	[16, 22]	[0, 16]
B 类城市（速度）	[25, 60]	[19, 25]	[0, 19]
C、D 类城市（速度）	[27, 60]	[21, 27]	[0, 21]

此外，邓卫等通过速度和占有率随着交通状态的变化，对高速公路上偶发性和常发性交通拥挤的判别进行了研究^[81]。达庆东等通过比较分析流量和占有率的关系在高峰小时与其他时段的不同，提出了拥挤小时的概念，增加了交通状态分辨的能力^[82]。李硕通过采用路段平均速度对交通拥挤进行实时判定和跟踪，克服了点速度在拥挤测度上的局限性^[83]。庄斌等通过研究路段上检测到的交通流量和占有率的在交通拥挤出现和消散过程中的相对增量变化，提出了城市道路路段上交通拥挤的平均占有率自动检测算法^[84]。刘建华对检测器采集的不同类型的交通流参数数据分别制定了不同的拥挤判别指标，并分别建立了拥挤分级标准^[85]。任其亮等基于服务水平划分标准，建立了路网交通拥挤的二级指标体系，并开发了相应的 H-Fuzzy 综合模糊评判模型^[86]。

综上所述，采取直观性方法时的数据易于收集，计算过程比较简单，应用比较方便，比较适合于高速公路、城市快速路、等级公路等具有长路段的道路的交通状态划分和拥挤测度。但是，直观性方法直接以各种交通参数的阈值为参考，当交通参数达到某一阈值区间时，不论实际交通状况如何，即将其认定为对应的交通状态，容易将短时的、小范围的交通波动误判为交通拥挤，从而导致对交通状态的判断不够准确。

1.2.2.2 复合性方法

所谓复合性方法,即在直观性方法的基础上,运用代数法、回归分析、主成分分析法、小波分析、人工神经网络等方法,统筹直观性方法中的多个指标,将多源指标进行数据集成与融合,从而开发出新的指标来衡量交通拥挤及其严重程度。

谈晓洁等研究了拥挤的空间分布特点并提出了一种实用的拥挤空间分布判别方法^[87]。路加通过引入行驶效率的概念,定义了拥挤度的隶属度函数,然后采用模糊推理提取判别规则进行交通拥挤测度^[88]。陈涛引入了交通序参数,将路段交通状态分为有序和无序状态,然后通过路段交通的无序度进行拥挤量化^[89]。姜桂艳等将占有率、速度和流量三个基础交通流参数进行组合得到新的特征变量,运用优化的多层前馈神经网络模型对特征变量进行处理从而判断是否有拥挤发生,通过分析模型输出结果的变化趋势区分常发性拥挤和偶发性拥挤^[90]。王建玲等在交通流理论的基础上,将实际车流运行状态相对于畅行状态时的损失率定义为拥挤度,以判断拥挤的发生与否及其严重程度^[91]。祝付玲分析了城市道路交通拥堵特性及主要影响因素,建立了符合城市道路交通特点的拥堵评价指标体系,并对相关指标进行了量化分析^[4,92]。陈宏方开发了基于协同模式识别的交通拥挤度判别模型,并成功应用于视频交通^[93]。夏雪等依据城市道路路段交通拥挤特性和影响因素,建立了城市道路路段交通拥挤评价指标体系,然后利用模糊评价原理,建立了基于信息熵的城市道路路段交通拥挤的模糊评价模型^[94]。刘磊等基于出行时间(行程时间)构建了交通拥挤指数,并开发了计算方法和评价标准^[95]。王婷婷等将占有率、速度、流量三个基本交通流参数进行处理,获得了新的交通拥挤判别指标,并通过改进的模糊综合评判算法对拥堵状态进行判定^[96]。黄玲等应用浮动车技术,结合路网静态拓扑结构,应用多重模糊推理,对路段拥挤程度量化和预测进行了研究^[97]。刘梦涵等引入累积 Logistic 回归分析,构建了以行程速度为自变量的道路交通拥挤强度评价模型,并验证了其有效性^[98,99]。张雪莲等提出了宏观、中观、微观三个层次上的拥