

ZHINENG JIAOTONG JISHU

智能交通技术

徐晓慧 于志青 编著



化学工业出版社



ZHINENG JIAOTONG JISHU

智能交通技术

徐晓慧 于志青 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了智能交通技术体系构建、交通信号智能控制技术、智能交通物联网技术、物联网条件下交通异常事件自动检测技术、道路交通智能监测技术、智能交通大数据技术、基于大数据的智能交通综合信息应用平台设计、智能交通地理信息技术等内容。

本书可供从事交通管理、交通规划、交通工程专业的科技人员参考，也可作为交通工程领域研究生、教师的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能交通技术/徐晓慧,于志青编著.—北京:化学工业出版社,2019.10

ISBN 978-7-122-35026-8

I. ①智… II. ①徐…②于… III. ①交通运输管理-智能系统 IV. ①U495

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 171263 号

责任编辑:辛田
责任校对:王静

文字编辑:冯国庆
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张10 $\frac{3}{4}$ 字数282千字 2019年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

随着我国经济的高速发展,制造业智能化转型升级进展迅猛,新技术的应用范围更加广泛,智能交通领域也正在进行着一场深刻变革。国家出台了促进智能交通发展的相关政策,许多学者也结合智能交通发展中存在的问题从不同侧面对智能交通进行了研究,取得的成果在应用方面发挥了较好的作用。如何将各种先进技术集成运用于智能交通中,扩大智能交通技术体系,促使智能交通的完善与发展,是目前交通领域研究的热点问题。

本书主要从技术角度出发,重点探讨支撑智能交通的控制技术、物联网技术、大数据技术、地理信息技术等,并说明这些技术的具体应用,其目的是构建一个内容丰富的智能交通技术体系。本书是基于道路智能交通叙述的,但所涉及的技术,有的也可用于其他交通行业,如轨道交通、水运等。

本书共分6章。第1章主要介绍了智能交通相关内容。第2章主要探讨了智能交通信号控制技术,包括智能交通信号控制系统的业务架构、控制架构,以及智能信号机技术、交通流量采集技术等,分析了许可型左转通行能力,并给出某一城区交通信号智能控制系统的设计。第3章主要研究了智能交通物联网技术,首先给出物联网技术的基本内容,其次分析智能交通物联网关键技术,包括交通要素的身份特征标识技术、信息精准获取技术等,本章最后给出基于物联网技术的城市智能交通系统、高速公路应急管理系统设计。第4章探讨了道路交通智能监测技术,主要内容有道路监控视频智能分析技术、智能卡口技术等。第5章研究了智能交通大数据技术,主要内容为交通大数据采集、处理与服务技术,给出基于大数据的交通便民服务平台、智能交通综合信息应用平台设计。第6章研究了智能交通地理信息技术,主要内容为交通信息的可视化展现及指挥调度,并对智能交通地理信息系统进行了设计。

本书在编写过程中参阅了一些学术著作、学位论文、文献资料,有的文献由于疏忽未能在参考文献中列出,在此谨向本书所直接或间接引用的研究成果的作者表示深切的谢意。

本书由河南警察学院徐晓慧教授、于志青共同完成,其中徐晓慧教授撰写第1章,于志青撰写第2章~第6章。

本书的部分内容是笔者主持或参与的科研项目取得的成果,如河南省科技攻关项目及重大科技项目:基于大数据的交通事件自动检测技术研究、基于物联网涉案事件视频图像综合应用平台的设计实现、物联网互通与共享体系架构研究、道路交通智能监控信息共享平台的研发与实现。另外还有校级项目:信号交叉口左转车流交通特性研究、道路交通大数据在便民服务中的应用研究。

本书的出版得到了河南省科技攻关项目(182102311063)和河南警察学院科研项目(HNJY-2017-02)的资助,在此深表感谢。

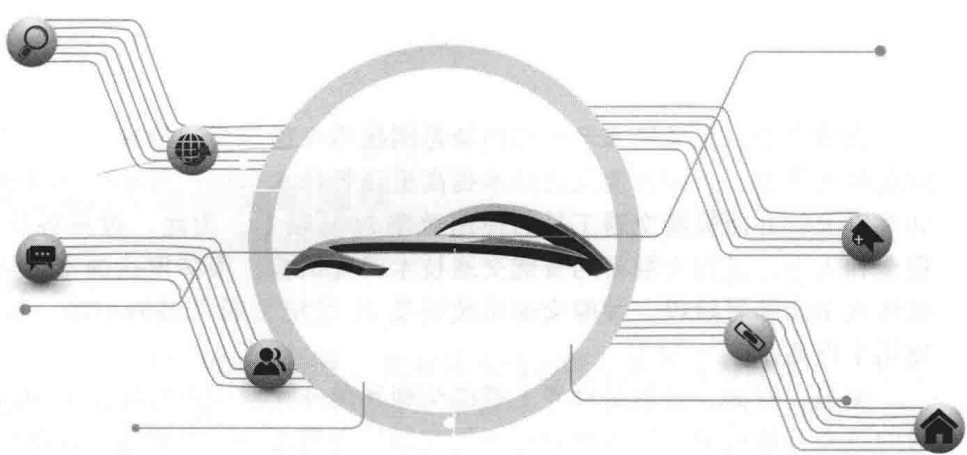
由于笔者水平有限,书中不足之处,恳请广大读者予以批评指正。

编著者

第 1 章 智能交通概论	1
1.1 智能交通的内涵及发展现状	1
1.2 智能交通技术的内涵和发展现状	3
1.3 智能交通系统的构成	5
第 2 章 智能交通信号控制技术	7
2.1 信号交叉口分析	7
2.2 许可型左转通行能力	9
2.3 智能交通信号控制	13
2.4 智能信号机技术	20
2.5 交通流量采集技术	24
2.6 智能信号控制设计	32
第 3 章 智能交通物联网技术	34
3.1 物联网概述	34
3.2 物联网应用分析	39
3.3 智能交通应用的物联网关键技术	44
3.4 物联网条件下交通异常事件自动检测技术	53
3.5 基于物联网的智能交通系统设计	56
3.6 基于物联网的高速公路应急管理系统设计	61
第 4 章 道路交通智能监测技术	74
4.1 道路视频监控智能分析技术	74
4.2 智能卡口技术（车辆智能监测记录系统）	91
4.3 闯红灯自动抓拍技术	103
第 5 章 智能交通大数据技术	110
5.1 大数据基本概念	110
5.2 大数据技术	111
5.3 大数据应用及发展趋势	116
5.4 智能交通大数据	117
5.5 基于大数据的智能交通综合信息应用平台设计	124
第 6 章 智能交通地理信息技术	129
6.1 地理信息技术	129
6.2 智能交通地理信息系统	136
6.3 智能交通地理信息数据模型	139
6.4 移动对象时空分析	144
6.5 智能交通路径分析	151
6.6 智能交通地理信息系统设计	157
参考文献	167

第 1 章

智能交通概论



1.1 智能交通的内涵及发展现状

1.1.1 智能交通的内涵

智能交通的概念于 1994 年由日本提出,并得到美国和欧洲的赞同。在此之前,美国智能车路协会(成立于 1990 年)把智能交通定义为智能车路,并倡议于 1993 年春召开智能车路系统世界大会;欧洲道路交通运输电子信息应用协调组织(成立于 1991 年)把智能交通称为远程信息通信在交通中的应用,并响应美国的倡议,于 1994 年 11 月在法国巴黎举行了第一届智能车路系统世界大会;日本车辆道路与交通智能学会(成立于 1994 年 1 月)也响应美国的倡议,并建议把大会的名称改为智能交通系统世界大会,此建议得到美国和欧洲的赞同,智能交通的名称由此得到业界认可。在《智慧城市词典》中,智能交通的含义为利用信息通信技术对交通信息进行收集、处理、发布、交换、分析和利用,为交通参与者提供多样化服务的交通管理模式。

目前,通俗地认为,智能交通(Intelligent Transportation Systems, ITS)是一个基于现代电子信息技术面向交通运输的服务系统。它是综合运用信息技术、人工智能、电子控制、地理信息、全球定位、影像处理、有线/无线通信等多种技术,所构建的一个具有快速准确的交通信息采集、处理、决策、指挥调度能力的管理系统,是交通信号控制系统、交通违法处理系统、交通视频监控系统和综合管理控制平台的有机集成。它的突出特点是以信息的收集、处理、发布、交换、分析、利用为主线,为交通参与者提供多样性的服务。智能交通使交通基础设施发挥出最大的效能,提高了交通管理服务的质量,从而获得巨大的社会效益和经济效益。

1.1.2 智能交通的发展现状

面对当今世界全球化、信息化发展趋势,传统的交通技术和手段已不适应经济社会发展的要求。智能交通系统是交通事业发展的必然选择,是交通事业的一场革命。通过先进的信息技术、通信技术、控制技术、传感技术、计算机技术和系统综合技术有效集成和应用,使人、车、路之间的相互作用关系以新的方式呈现,从而实现实时、准确、高效、安全、节能的目标。

交通安全、交通堵塞及环境污染是困扰当今国际交通领域的三大难题，尤其以交通安全问题最为严重。采用智能交通技术提高道路管理水平后，每年仅交通事故死亡人数就可减少30%以上，并能提高交通工具的使用效率50%以上。为此，世界各发达国家竞相投入大量资金和人力，进行大规模的智能交通技术研究试验。很多发达国家已从对该系统的研究与测试转入全面部署阶段。智能交通系统将是21世纪交通发展的主流，这一系统可使现有公路使用率提高15%~30%。

美国、欧洲、日本是世界上智能交通系统开发应用最好的国家和地区。日本对于智能交通的研究开始较早，日本政府对智能交通研究很支持，在智能交通研究过程中，非常重视各个部门的通力合作及对交通信息的采集和维护。日本在1994年成立了由警察厅、通商产业省、运输省、邮政省、建设省五部门支持的“车辆-道路-交通智能化联席协会”来推广智能交通领域的技术和产品研究开发。

我国在智能交通领域的研究起步较晚，1987~2006年我国在智能交通领域处于研发初期阶段，2006年后我国在智能交通领域的专利数量出现指数型增长，增长速度超过任何国家，并在2016年以后我国对智能交通技术研发的专利数量超越所有国家，这说明后期我国对智能交通技术的重视和发展热度，后期发展速度强劲。

从专利发展情况看，智能交通系统的发展，已不限于解决交通拥堵、交通事故、交通污染等问题。经30余年的发展，ITS的开发应用已取得巨大成就。美国、欧洲、日本等发达国家和地区基本上完成了ITS体系框架，在重点发展领域大规模应用。可以说，科学技术的进步极大地推动了交通的发展，而ITS的提出并实施，又为高新技术提供了广阔的发展空间。

随着传感器技术、通信技术、GIS技术（地理信息系统）、3S技术（遥感技术、地理信息系统、全球定位系统三种技术）和计算机技术的不断发展，交通信息的采集经历了从人工采集到单一的磁性检测器交通信息采集，再到多源的多种采集方式组合的交通信息采集的历史发展过程，同时国内外对交通信息处理研究的逐步深入，统计分析技术、人工智能技术、数据融合技术、并行计算技术等逐步被应用于交通信息的处理中，使交通信息的处理得到不断发展和革新，更加满足ITS各子系统管理者、用户的需求。

在20世纪90年代初，我国首次提出智能交通系统的概念，并且逐渐开始关注国际上先进交通系统的发展成果和趋势，大力学习并积极借鉴国外先进国家的发展经验，在国内发展较为领先的试点城市投入实践。1995年，国家技术监督局在我国建立特色交通部作为智能交通系统的试验点和控制室，全程监督新型智能交通的利用情况，与此同时，原国家科委也及时创办了能够增进ITS领域的交流与合作的会议机构，大力支持城市智能交通系统的研究使用，加强了我国交通领域工作人员和研究人员的的工作经验，加深了其专业知识储备。

进入21世纪后，我国ITS的研究、试验和国际交流活动日益频繁，许多高校和企业相继进入该研究领域，清华大学、东南大学、中兴通讯、中国普天、东软集团等相继建立ITS研究机构，组织ITS关键技术的突破创新和示范工程。同时国家相关部门也将ITS列入“九五”“十五”的科技发展规划当中，并相继建立了全国智能交通示范城。

从发展趋势来看，物联网和智能交通的结合将是必然的选择，物联网、云计算等现代信息技术处理能力将成为未来智能交通发展的核心技术。



1.2 智能交通技术的内涵和发展现状

1.2.1 智能交通技术的内涵

智能交通技术是在互联网、物联网、信息化、高新技术的相互促进下发展起来的，重点解决交通拥堵、交通事故以及当下严重的环境污染等一系列问题而产生的信息化交通技术。对于当下随着汽车购买量增加带来的交通拥堵给城市发展带来的难题和环境污染，严重影响了人们的健康生活，因此只有正确把握智能交通技术的发展方向和各个国家技术研究热点，才能更准确地投入人力、物力与财力，对智能交通技术进行深入研究，最终才能够更好地解决我国的交通问题和发展我国的交通行业。

智能交通的发展是我国实现强国战略目标中重要的一部分，对于智能交通技术的研究包含了政策性研究和技术性研究。政策性研究主要针对产业结构、产业政策等产业相关问题提出合理建议；技术性研究主要是利用相关研发技术对交通运输问题提出解决方案。国内对智能交通的政策研究比较多，利用政策来规划交通运输产业发展，国外侧重于对交通运输与国际贸易的研究。国外对智能交通与新兴技术的融合进行了深入研究，而国内对智能交通的研究还处于初级研发阶段，对智能交通的技术发展缺少深入研究，缺少对智能交通技术的宏观分析和预测。为了更好地发展智能交通，应深入研究智能交通的技术发展历程，以尽快缩小我国与世界先进智能交通技术国家之间的差距。

1.2.2 智能交通技术的发展现状

(1) 智能交通技术发展第一阶段（1993~1997年）

1993年左右对于智能交通技术来讲是具有重大技术变革的时间。在这个时间段内，智能交通技术主要表现在车辆全球定位系统的报警与控制方法和车辆导航的控制及安全系统等车辆控制系统的发展，在1993年加入导航系统技术，实现了通过动态控制处理器来感知和控制车辆的操作及状态，并允许发送紧急信号。美国GPS（全球定位系统）技术的发展史，基本从1990年末首颗Block II A卫星发射开始，持续到1997年美国完成19颗Block II A卫星的发射；1993年美国GPS卫星导航定位系统就具备初步作战能力，并提供给民用用户使用，从而反映出GPS技术于1993年在美国广泛应用。

1994年通过GPS技术应用在汽车领域，完成汽车速度控制系统和车辆定位报警系统，通过GPS导航计算机和接收器，将导航地图数据与车载引擎计算机相互连接。

1974~1997年间，智能交通技术在无线电相关领域热度较大，其主要研究了无线电导航、无线电定向、采用无线电波的反射或再辐射的定位，但后期该技术领域发展缓慢；交通控制系统、电子传输、电子装置在该时期研究热度前期较低，但是后期研究数量急剧增加，智能交通技术选择交通控制系统、电子传输、电子装置等相关技术进入下一个技术发展阶段。

在1974~1997年间，交通控制系统发展缓慢，导航技术和全球定位技术发展迅速。通信领域中的移动通信、蜂窝通信、无线通信在智能交通技术领域中出现较晚，并且一直持续到1994年都是平稳发展，但是在1994年以后通信领域在智能交通领域中得到快速发展。

(2) 智能交通技术发展第二阶段（1998~2008年）

该阶段，导航技术、全球定位技术在智能交通技术领域中已经进入稳定发展的态势，导航和全球定位技术已经达到完整布局；控制系统在该阶段依然得到稳步发展；该阶段无线通

信、移动通信、蜂窝通信等技术的发展,对车辆通信的应用附加在车辆控制系统中;通信领域在该阶段得到发展并带动控制系统的发展,在该阶段通信领域对控制系统的带动作用慢慢大于导航技术产生的作用。该阶段智能交通技术主要融合了无线通信技术和数字信息传输技术,交通控制系统处于平稳发展。

(3) 智能交通技术发展第三阶段 (2009~2016年)

该阶段美国一直处在智能交通技术领域的领先地位,但是欧盟和日本的发展也不容小觑。从专利上看,主要集中在通信网络领域,包括蜂窝电话、减少移动设备电池损耗、编码信息发送到所标识的目的地组件、移动网络的流量管理、移动设备中优化无线网络。

该时期控制系统相关领域与通信系统相关领域成为智能交通技术发展的主流,并且通信领域和控制领域之间在该时期融合比较多。

综合三个阶段分析,可以得出如下结论。

智能交通技术的发展是技术融合的结果,1987~1997年为智能交通功能实现阶段,该阶段主要研究全球定位系统,实现汽车定位功能,射频识别技术实现车辆自动识别功能,传感器网络实现车辆信息搜集功能,主要将相关的技术应用在智能交通技术相关的技术功能模块,这些技术功能模块因需求应用而产生,但彼此相互独立。

1998~2008年为智能交通信息交互阶段,该阶段主要实现了车内通信和车外通信,车外通信包含了汽车和道路通信,汽车和人通信,汽车和汽车通信。在此阶段主要利用通信技术、互联网技术、数据库技术、传感器技术等实现智能交通技术的信息交互,该阶段的通信是独立的,在智能交通子系统建设中实现要素之间信息的交互。

2009~2016年为智能交通信息到功能的反向开发阶段,该阶段随着大量的交通数据的产生和交通信息交互,利用信息管理、云计算等方法研究智能交通在城市化服务中心的停车收费问题、智能交通领域违章检测、安全驾驶等;通过对当下物联网和云计算等新兴技术的应用结合,实现智能交通在移动互联、数据融合、数据通信、智能识别等技术突破,将智能交通相关的技术要素进行互联互通,达到元素间相互协作的状态,实现交通的智能化管理和运行。

就智能交通技术的发展而言,1987~1997年为智能交通要素涌现阶段,为基本功能的实现提供基础,形成智能交通技术相关的基本功能模块。

1998~2008年为智能交通结构技术的形成阶段,该阶段主要实现了车内外通信,实现智能交通要素之间信息的交互;2009~2016年为智能交通要素和结构的进一步升华阶段,引进了大数据和云计算等要素,从而使智能交通在城市化服务中心具有了停车收费、违章检测、安全驾驶、自动驾驶等功能。而下一个阶段,智能交通的发展方向是形成新的技术范式和技术标准,并通过“人工智能工艺的创新”,使智能交通技术成熟化。深度学习、文本挖掘和数据挖掘等人工智能技术实质上是“数据和信息”的加工技术,全球定位、射频识别和传感器网络实现“数据和信息”的收集功能;互联网、5G、云计算等结构技术,实现信息和数据的流通、整合和控制;而人工智能等“数据和信息”的加工技术属于智能交通的“工艺技术”。

因此智能交通技术的发展史为“功能-信息”的信息采集技术应用模式研究开发向“信息-功能”的信息资源开发应用模式研究开发转变的过程,该过程的转变涵盖技术的变革,从模块化的要素的研究开发转为结构完善和系统优化的研究开发过程,再到技术范式的形成,和人工智能等数据和信息加工技术的创新。总之在互联网、大数据、通信网络、物联网技术的背景下,智能交通逐渐成为改造传统交通的主要技术方向。智能交通通过及时、快速、准确地获得各种交通要素的信息,通过大数据和物联网技术对信息分析、整合、处理、



应用,实现整体系统化、信息化管理和控制,从而提升当下交通的管理服务能力,改善人们的交通生活。

1.3 智能交通系统的构成

从应用领域来看,目前我国智能交通系统主要包括交通信息服务系统、交通管理系统、公共交通系统、车辆控制系统、电子收费系统、紧急救援系统等。

(1) 交通信息服务系统(ATIS)

ATIS是建立在完善的信息网络基础上的。交通参与者通过装备在道路上、车上、换乘站上、停车场上以及气象中心的传感器和传输设备,向交通信息中心提供各地的实时交通信息;ATIS得到这些信息并通过处理后,实时向交通参与者提供道路交通信息、公共交通信息、换乘信息、交通气象信息、停车场信息以及与出行相关的其他信息;出行者根据这些信息确定自己的出行方式并进行路线选择。更进一步,当车上装备了自动定位和导航系统时,该系统可以帮助驾驶员自动选择行驶路线。

(2) 交通管理系统(ATMS)

ATMS有一部分与ATIS共用信息采集、处理和传输系统,但是ATMS主要是给交通管理者使用的,用于检测控制和管理公路交通,在道路、车辆和驾驶员之间提供通信联系。它将对道路系统中的交通状况、交通事故、气象状况和交通环境进行实时监视,依靠先进的车辆检测技术和计算机信息处理技术,获得有关交通状况的信息,并根据收集到的信息对交通进行控制,如信号灯、发布诱导信息、道路管制、事故处理与救援等。

(3) 公共交通系统(APTS)

APTS的主要目的是采用各种智能技术,促进公共运输业的发展,使公交系统实现安全、便捷、经济、运量大的目标。如通过个人计算机、闭路电视等向公众就出行方式和事件、路线及车次选择等提供咨询,在公交车站通过显示器向候车者提供车辆的实时运行信息。在公交车辆管理中心,可以根据车辆的实时状态合理安排发车、收车等计划,提高工作效率和服务质量。

(4) 车辆控制系统(AVCS)

AVCS的目的是帮助驾驶员实行车辆控制的各种技术,从而使汽车行驶安全、高效。AVCS包括对驾驶员的警告和帮助,障碍物避免等自动驾驶技术。

(5) 电子收费系统(ETC)

ETC是目前世界上最先进的路桥收费方式。通过安装在车辆挡风玻璃上的车载器与在收费站ETC车道上的微波天线之间的微波专用短程通信,利用计算机联网技术与银行进行后台结算处理,从而达到车辆通过路桥收费站不需停车而能交纳路桥费的目的,且所交纳的费用经过后台处理后清分给相关的收益业主。在现有的车道上安装电子不停车收费系统,可以使车道的通行能力提高3~5倍。

(6) 紧急救援系统(EMS)

EMS是一个特殊的系统,它的基础是ATIS、ATMS和有关的救援机构及设施,通过ATIS和ATMS将交通监控中心与职业的救援机构联成有机的整体,为道路使用者提供车辆故障现场紧急处置、拖车、现场救护、排除事故车辆等服务。发生交通事故时,该系统能够快速做出处理,合理疏导交通。该系统分为车辆故障、事故救援、事故救援派遣和救援车辆优先通行四个方面。

在高速公路上,通过尽早发现和异常情况排除,可以减少交通延误,大大降低交通事故

的伤亡率。利用视频监控或检测发现拥堵或交通事故后，交警、消防、医疗等部门及时到达现场，采取处理事故、抢救伤员、对车辆进行牵引、改变交通管理控制方法、给过往驾驶员提供道路信息等措施，实现部门的紧急联动，使意外能够在最短的时间内得以解决，降低伤害程度。

(7) 智能交通缉查布控系统

2013年，公安部交管局在全国组织推广了机动车缉查布控系统联网。卡口系统，其学名为公路车辆智能监测记录系统，通过对道路上行驶的车辆进行监测，并记录车辆的图像、号牌信息，形成车辆轨迹数据。多个卡口联网后，就成为缉查布控系统。

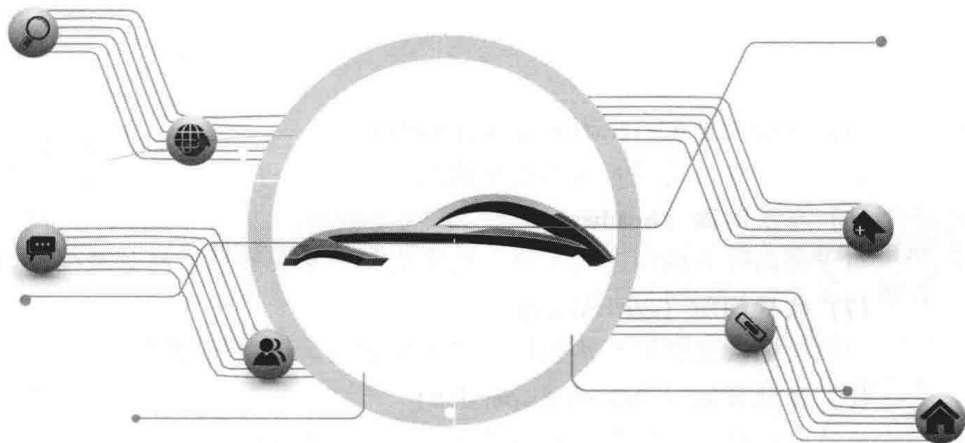
缉查布控系统是为了规范各类机动车监控系统，形成统一的行驶机动车特征信息的存储、发布、共享、利用模式和机制，实现被盗抢、事故逃逸等涉案车辆信息的迅速发布、布控、缉查、报警，通过各类机动车监控系统资源建立统一的机动车监控系统平台，挖掘和提高机动车监控系统的潜在功能和应用效果，为公安机关打击机动车违法犯罪行为提供技术保障。近年来随着智能交通、移动业务的发展，缉查布控系统联入互联网移动报警信息，可以实现实时报警处理。

一般缉查布控系统集成指挥平台提供即时的路面各个路口的流量、各类车辆的通行、车辆速度等情况，发现嫌疑车辆后报警，指挥中心在接到预警后，进行签收，并对预警信息进行有效性比对，将无效信息直接进行反馈，将有效信息通过对讲机向辖区中队民警下达拦截指令，辖区中队民警出警拦截。如果未拦截到车辆，要向指挥中心做未拦截反馈，指挥中心进行系统反馈。车辆拦截后要检查车辆违法状态，开具现场处罚文书，拍摄嫌疑车辆及驾驶员的现场照片，并将处罚文书及现场照片反馈至指挥中心。指挥中心根据中队反馈信息，进行现场处罚文书录入，录入后向系统进行拦截反馈，最后将现场拦截照片上传至集成指挥平台。



第2章

智能交通信号控制技术



2.1 信号交叉口分析

2.1.1 信号交叉口

城市道路交叉口是城市道路网络的基本节点，交通流的中断多发生在此，同时也是城市道路网络交通流的瓶颈所在，交通堵塞也多发生在此。一般来说，城市道路交叉口是城市交通堵塞、交通事故频发及交通污染等交通问题的主要发生区域。城市道路交叉口的交通问题一直是交通管理领域研究的主要问题，如交叉口控制方式、交叉口交通流特性等内容。城市道路交叉口可分为有信号灯控制（简称信号交叉口）和无信号灯控制（简称无信号交叉口）两种，其中无信号交叉口是最基本、最普通的交叉口类型，是信号交叉口研究的基础。对信号交叉口而言，通行能力是设计信号配时、分析信号交叉口交通状况的基础，衡量信号交叉口的服务水平一般有延误和排队长度等指标。

信号交叉口车流的运行特性及其通行能力，与信号配时有一定的关系。为便于研究，主要采取固定式配时的单信号交叉口。首先介绍两个概念：相位和绿灯间隔时间。所谓相位，就是指在一个信号周期内一股或几股车流，不管任何瞬间都获得完全相同的信号灯显示，那么就把它获得不同灯色的连续时序称作一个信号相位。绿灯间隔时间指一个相位绿灯结束到下一个相位绿灯开始之间的时间，这是为了避免下一个相位头车同上一相位尾车在交叉口内相撞所设，也叫交叉口清车时间。

交叉口交通特性如下。

(1) 排队长度 (queue length)

交叉路口停车线后排队的车辆数或所占路段长度。

(2) 车辆检测器 (vehicle detector)

检测车辆的存在及通过状态的装置。

(3) 交通流特性 (characteristics of traffic flow)

交通流的流量、密度和速度的特征。

(4) 延误 (delay)

车辆通过交叉路口或路段所需时间与正常行驶同样距离所需时间的差值。

(5) 交通流密度 (traffic flow density)

某一时刻单位道路长度内的车辆数。

(6) 车头时距 (headway)

对于同向行驶的两连续车辆，前车头与后车头通过道路某截面的时间间隔。

(7) 临界间隙 (critical gap)

一股交通流能够给车辆或行人安全穿越的最小时间间隔。

(8) 车队离散 (platoon dispersion)

车队在行驶过程中车头时距逐渐增大的交通现象。

(9) 进口车道通行能力 (approach lane capacity)

在一定信号控制条件下，车辆通过交叉口某进口车道停止线的最大当量流率，即饱和流量与绿信比之积。

(10) 交叉口通行能力 (intersection capacity)

交叉口各进口车道通行能力之和。

(11) 转弯类型 (turn type)

① 许可型转弯 (permitted turn): 穿过冲突的行人或对向车辆实现的转弯，例如对于左转，可视为对向直行交通流的许可转弯；对于右转，可视为冲突人行横道上行人流的许可转弯。

② 保护型转弯 (protected turn): 没有任何冲突的转弯，例如专用左转相位或禁行冲突行人过街的右转相位内的转弯。

③ 无冲突转弯 (not opposed turning movements): 指虽然没有专用的左转相位，但因为交叉口的特性，这些左转从来不会与直行相冲突，例如单向街道、T形交叉口或信号相位将冲突中的所有流向在时间上进行彻底分离。

(12) 可接受间隙 (acceptable gap)

支路车辆可接受的能够穿越主要道路车流的时间。

(13) 红灯右转 (right turn on red)

即使面对是红灯，车辆也可以右转通过交叉口。

(14) 临界间隙 (critical gap)

主要道路上连续行驶的车辆之间，支路上车辆能够穿越的最小时间。

(15) 服务水平 (level of service)

描述交通流内部运行状态的量化指标，通常使用速度、旅行时间、延误、交通间断、驾驶自由度等服务指标描述。

(16) 流向 (movement)

对放行信号做出反应的交通流的运动方向。典型的流向分为左转流向、直行流向和右转流向。

(17) 进口道 (approach)

交叉口的一个方向包括左转、直行、右转的一系列车道。

(18) 信号灯组 (signal light group)

一组控制车辆或行人的信号灯。

(19) 车道组 (lane group)

由一条或多车道组成，具有同样的停止线，服务同一股交通流向，其通行能力被在同一组里的所有车辆所共享。



2.1.2 饱和流量和有效绿灯时间

(1) 饱和流量

当信号灯转为绿灯显示时,原先等候在停车线后面的车流便开始向前运动,车辆越过停车线,其流率由零很快增至一个稳定的数值,即饱和流量 S (或称饱和流率)。此后,越过停车线的后续车流将保持与饱和流量 S 相等,直到停车线后面积存的车辆全部放行完毕,或者虽未放行完毕但绿灯时间已经截止。在绿灯点亮的最初几秒,流率变化很快,车辆从原来的静止状态开始加速,速度逐步由零变为正常行驶速度。在此期间,车辆通过交叉口(停车线)的车流量要比饱和流量低些。同理,在绿灯结束后的黄灯时间(许多国家的交通法规允许车辆在黄灯时间越过停车线)或者在绿灯开始闪烁后,由于部分车辆因采取制动措施而已经停止前进,部分车辆虽未停止但也已经开始减速,因此通过交叉口(停车线)的流量便由原来保持的饱和流量水平逐渐地降下来。当然这里主要是指直行车流而言的,左转车流在黄灯期间通过交叉口的流量反而会变得更大一些,这是因为由于对向直行车存在,使得左转车在绿灯期间只能聚集在路口中央等候区待机通行。这样在绿灯结束时便积存下一些左转车,它们只能利用黄灯时间迅速驶出路口,只是对左转车流另做些特殊考虑。右转车流若不受信号灯控制,其运动特性也应另做考虑。

必须注意的是,只有当绿灯期间停车线后始终保持有连续的车辆时,车流通过停车线的流率才能稳定在饱和流量的水平上。在绿灯结束之前,始终都有车辆连续不断地通过停车线。可计算出一个平均周期内实际通过交叉口的车辆数。

(2) 有效绿灯时间

用来为交通流提供服务的时间称为有效绿灯时间。绿灯信号的实际显示时段与有效绿灯时段是错开的。有效绿灯时间的起点滞后于绿灯实际起点,这一段滞后的时间差称为“绿灯前损失”。同样,有效绿灯时间的终止点也滞后于绿灯实际结束点(这当然指黄灯期间允许车辆继续通行的情况),将这一段滞后时间差称作“绿灯的后补偿”。由此可得到有效绿灯时间。

某相位实际显示的绿灯时间与间隔时间之和减去该相位总损失时间后实际用于该相位车辆通行的时间即为该相位的有效绿灯时间。一个周期的有效绿灯时间则为周期时长减去周期内总损失时间。有效绿灯时间用 g_e 表示,单位通常为 s 。

信号周期中相位 1 的有效绿灯时间表示如下。

$$g_{e_1} = G_1 + A_1 + AR_1 - l_1$$

式中 g_{e_1} ——相位 1 的有效绿灯时间, s ;

G_1 ——相位 1 的显示绿灯时间, s ;

A_1 ——相位 1 的黄灯时间, s ;

AR_1 ——相位 1 的全红时间, s ;

l_1 ——相位 1 的总损失时间,等于启动损失时间与清场损失时间之和, s 。

2.2 许可型左转通行能力

2.2.1 许可型左转研究现状

目前,城市道路信号交叉口研究一直是道路交通管理方面研究的热点问题,许多学者从不同角度、不同侧面进行了剖析,涉及多种场景,采用了多种方法,如概率统计、随机过程、排队论、图形法、观察法等,提出了多种模型,并分析了各种模型的优缺点,也即是适

应于不同的交通流。在对信号交叉口的研究中，左转交通流是整个交叉口交通流研究的重点和难点。一个交叉口，为了解决通行权在时间上的分配，可用交通信号来控制，其中左转交通流的左转控制，常用的有保护型左转和许可型左转。按照道路交通安全法实施条例的规定，绿色信号允许车辆直行和左转，左转车辆不得妨碍对向放行直行车辆，故许可型左转车辆只能利用可接受间隙左转；而保护型左转只能在左转相位内左转，其运行特征与直行车辆的运行特征相似。因此，许可型左转与保护型左转有较大区别，许多学者对左转交通流的研究重点是许可型左转，有学者研究的场景为：在对向只有一股直行车流的情况下，单个左转车道、两个左转车道、多个左转车道。当对向有两股或多股直行车流时，研究的内容不多。还有学者研究了在无信号交叉口的情况下，两股对向直行车流的车头时距服从负指数分布时，左转车流的通行能力。当两股对向直行车流车头时距更贴近实际的爱尔朗分布时，左转车流的通行能力很少有学者研究，有的只讨论了特例。本节利用随机过程与排队论理论，重点研究城市道路信号交叉口许可型左转的情况，这种情况随着城市道路的发展出现得越来越多，尤其是城市道路快速发展的今天，左转车流穿越对向多股直行车流是信号交叉口研究领域的难点和重点。这类信号交叉口的运行特征，包括通行能力、排队长度、等待时间、延误时间等，是设计控制信号的基础。本节重点讨论的是一股左转车流穿越两股对向直行车流的情况，假设两股对向直行车流车头时距服从爱尔朗分布，给出了左转车流的通行能力计算公式。通过观察法找到了参数的取值，计算出有信号交叉口左转车道的通行能力。本节的讨论可为这类信号交叉口设计和渠化提供理论支撑，研究采用的方法也适用多股对向直行车流和多股左转车流。

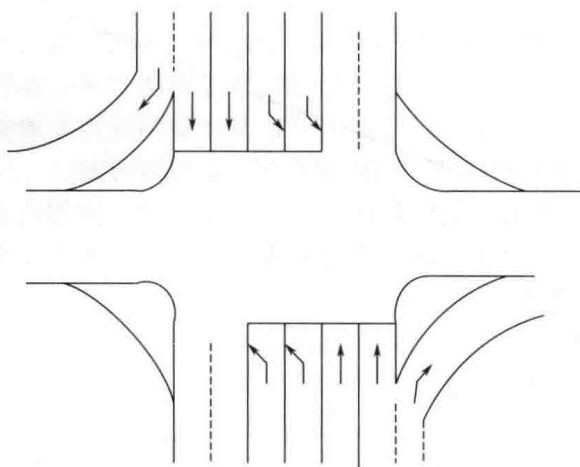


图 2-1 许可型左转交叉口车道渠化示意图

爱尔朗分布的概率密度函数为

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{l-1}}{(l-1)!} \quad x \geq 0 \quad (2-1)$$

式中 λ ——参数 $\lambda > 0$ ；

l ——1, 2, 3... 的正整数。

λ 和 l 可用样本的均值和方差算出。

在许可通过的时间内，左转车辆要穿过对向两股直行车流，左转车辆只能按间隙穿过。

设 t 是直行车流的间隙， $g(t)$ 是在 t 时间内能进入的左转车流的车辆数， $f(t)$ 是直行车流间隙分布的概率密度函数， q 是两股直行车流的流量总和，则左转车流的通行能力 q_n 可由下式计算得出。

2.2.2 许可型左转通行能力分析

(1) 信号交叉口模型

信号交叉口为双向 6 车道，许可型左转，其中进口处 2 条直行道，2 条左转道（右转道为专用道，设在提前进入交叉口的位位置）。如图 2-1 所示，当绿灯亮起时，左转和直行同时放行，每一条左转道的左转车辆都要通过对向两股直行车辆，整个路口左转车道通行能力为每条左转车道通行能力之和。现假设左转车流泊松达到，负指数分布，两股对向直行车辆车头时距分布独立，同服从爱尔朗分布。



$$q_n = q \int_0^h f(t)g(t)dt \quad (2-2)$$

式中 h ——有效绿灯时间。

式(2-2)中 $g(t)$ 一般有固定的表达式。

$$g(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ \frac{t-t_0}{t_f} & t \geq t_0 \end{cases}$$

式中, $t_0 = t_c - \frac{t_f}{2}$ (t_f 、 t_c 为常数, t_f 为跟随时间; t_c 为临界时间)。

(2) 左转车流计算公式

以上是一般的左转车辆流量的计算公式, 对于我们的模型, $f(t)$ 应是左转车辆穿过两股对向直行车辆间隙的概率密度, 即左转车辆利用两股对向直行车流的间隙连续穿过。依据排队论观点, 将左转车辆利用对向直行车流的间隙穿过的行为视为服务, 则穿过一个对向直行车流可视为接受一次服务, 连续穿过两股对向直行车流可视为连续接受两次服务, 这是多服务台串联单队列排队模型。因为两股对向直行车流车头时距独立同分布, 现假设 X 、 Y 分别为两对向直行车流车头时距随机变量。左转车辆穿越两对向直行车流的模式可以视为左转车流穿过一个由两股对向直行车流合成的一股对向直行车流, 而这股合成的对向直行车流的车头时距也是随机变量, 左转车流要按间隙穿过, 若用 Z 表示这个由两股对向直行车流合成的直行车流车头时距随机变量, 则 $Z = X + Y$, 设 $f_z(z)$ 是 Z 的密度函数, 要想利用公式(2-2), 应先求出 $f_z(z)$ 。下面求解 $f_z(z)$, 设 $f(x, y)$ 是 X 、 Y 的联合密度函数, 因 X 、 Y 独立同分布, 则

$$f(x, y) = f_X(x)f_Y(y) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{l-1}}{(l-1)!} \lambda e^{-\lambda y} \frac{(\lambda y)^{l-1}}{(l-1)!} & x > 0, y > 0 \\ 0 & \text{其余} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \lambda^2 \frac{(\lambda x \lambda y)^{l-1}}{[(l-1)!]^2} e^{-\lambda(x+y)} & x > 0, y > 0 \\ 0 & \text{其余} \end{cases}$$

$Z = X + Y$ 的值域为 $(0, \infty)$, 当 $z > 0$ 时, 有

$$F_z(z) = P(Z \leq z) = P(X + Y \leq z) = P[(x, y) \in D_z] = \iint_{D_z} P(x, y) dx dy$$

其中 $D_z = \{(x, y) : x > 0, y > 0 \text{ 且 } x + y \leq z\}$, 如图 2-2 所示。

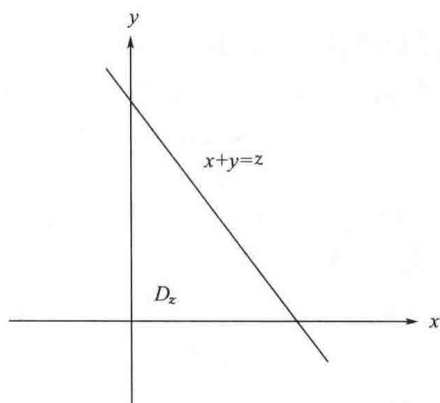


图 2-2 积分区域 D_z

从而, 当 $z > 0$ 时, 有

$$\begin{aligned}
 F_Z(z) &= \int_0^z dx \int_0^{z-x} \lambda^2 e^{-\lambda(x+y)} \frac{(\lambda x \lambda y)^{l-1}}{[(l-1)!]^2} dy \\
 &= \int_0^z \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{l-1}}{(l-1)!} dx \int_0^{z-x} \lambda e^{-\lambda y} \frac{(\lambda y)^{l-1}}{(l-1)!} dy \\
 &= \int_0^z \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{l-1}}{(l-1)!} [-l(e^{-\lambda(z-x)} - 1)] dx \\
 &= -\int_0^z \frac{\lambda l}{(l-1)!} (\lambda x)^{l-1} e^{-\lambda x} dx + \int_0^z \lambda l \frac{(\lambda x)^{l-1}}{(l-1)!} e^{-\lambda x} dx \\
 &= -\frac{1}{(l-1)!} (\lambda z)^l e^{-\lambda z} - l e^{-\lambda z} + 1
 \end{aligned}$$

所以, $f_Z(z) = F'_Z(z)$

$$= -\frac{\lambda l}{(l-1)!} (\lambda z)^{l-1} e^{-\lambda z} + \frac{\lambda (\lambda z)^l}{(l-1)!} e^{-\lambda z} + l e^{-\lambda z} \dots \quad (2-3)$$

当 X 、 Y 、 Z 的概率密度函数都为爱尔朗分布的情况是特例, 但根据计算得到的式(2-3)可知, Z 的分布不一定是爱尔朗分布, 因此有的学者讨论的只是特殊情况。

利用式(2-2), 代入随机变量 Z 的密度函数的表达式。

$$\begin{aligned}
 q_n &= q \int_0^h f_Z(t) g(t) dt \\
 &= q \int_{t_0}^h \left[\lambda l e^{-\lambda t} + \frac{\lambda (\lambda t)^l}{(l-1)!} e^{-\lambda t} - \frac{\lambda l (\lambda t)^{l-1}}{(l-1)!} e^{-\lambda t} \right] \frac{t - t_0}{t_f} dt \\
 &= \frac{q}{t_f} \int_{t_0}^h \left[\lambda l e^{-\lambda t} t + \frac{\lambda (\lambda t)^l}{(l-1)!} e^{-\lambda t} t - \frac{\lambda l (\lambda t)^{l-1}}{(l-1)!} e^{-\lambda t} t \right] dt \\
 &\quad - \frac{q t_0}{t_f} \int_{t_0}^h \left[\lambda l e^{-\lambda t} + \frac{\lambda (\lambda t)^l}{(l-1)!} e^{-\lambda t} - \frac{\lambda l (\lambda t)^{l-1}}{(l-1)!} e^{-\lambda t} \right] dt \\
 &= \frac{q}{\lambda t_f} \left[2l(e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) + \frac{\Gamma(l+2)}{(l-1)!} (e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) - \frac{l\Gamma(l+1)}{(l-1)!} (e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) \right] \\
 &\quad - \frac{q t_0}{t_f} \left[(l e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) + \frac{\Gamma(l+1)}{(l-1)!} (e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) - \frac{l\Gamma(l)}{(l-1)!} (e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) \right] \\
 &= l(e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) \left(\frac{3q}{\lambda t_f} - \frac{q t_0}{t_f} \right) \\
 &= ql(e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda h}) \frac{3t_f - \lambda t_0}{\lambda t_f} \quad (2-4)
 \end{aligned}$$

(3) 某实际许可型左转交叉口通行能力计算

选择某市一个交叉口。此处为信号交叉口, 南北向为双向 6 车道, 进口处 4 车道, 双左转双直行, 右转道已提前, 许可型左转, 有效通行时间为 45s。下面以这个交叉口为例, 说明式(2-4) 的应用。

式(2-4) 表明, 左转车道的通行能力与两股对向直行车辆的流量以及参数 λ 、 l 、 q 有一定关系, 要计算 q_n , 应先求出这些参数。

一条单车道通行能力计算公式为

$$q_1 = \frac{1000u}{h_d} \quad (2-5)$$

式中 q_1 ——通行能力;

