


交通运行管理丛书 | 过秀成 主编

# 城市交叉口群交通 动态协调控制方法

Dynamic Traffic Coordination Control Method  
for Intersection Group

杨洁 过秀成 著

 东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

交通运行管理丛书

# 城市交叉口群交通

## 动态协调控制方法

杨 洁 过秀成 著



东南大学出版社

— 1 —

## 图书在版编目(CIP)数据

城市交叉口群交通动态协调控制方法 / 杨洁, 过秀成著. —南京: 东南大学出版社, 2013. 11  
(交通运行管理丛书 / 过秀成主编)  
ISBN 978-7-5641-4594-1

I. ①城… II. ①杨… ②过… III. ①城市道路—交叉路口—协调控制系统—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 246054 号

## 城市交叉口群交通动态协调控制方法

---

出版发行: 东南大学出版社  
社 址: 南京市四牌楼 2 号 邮编: 210096  
出 版 人: 江建中  
网 址: <http://www.seupress.com>  
电子邮箱: [press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)  
经 销: 全国各地新华书店  
印 刷: 兴化印刷有限责任公司  
开 本: 700 mm×1 000 mm 1/16  
印 张: 14.5  
字 数: 276 千字  
版 次: 2013 年 11 月第 1 版  
印 次: 2013 年 11 月第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978-7-5641-4594-1  
定 价: 45.00 元

---

本社图书若有印装质量问题, 请直接与营销部联系。电话(传真): 025-83791830

# 前 言

随着我国城市发展规模的扩大与空间结构的调整,交通需求总量增加,出行距离增长,交通时空资源供给与需求的不均衡性日益显现。城市交通拥堵呈现出从偶发性向常态化转变、拥堵范围从局部向区域扩展、拥堵时间从高峰时段向平峰时段延伸的态势,城市交通系统运行面临严峻挑战,提高路网的通行能力与服务水平成为缓解城市交通拥堵的重要举措。

城市道路信号控制交叉口群为道路网中地理位置相邻且存在较强关联性的若干信号控制交叉口的集合。本书将研究对象从单个路段或交叉口拓展至整个交叉口群范围,分析交叉口群内交通网络各要素及其相互作用机理,研究交叉口群交通流运行特征,建立交叉口群交通流模型,考虑城市道路信号控制交叉口群交通时空资源的综合利用,构建信号交叉口群交通控制策略与系统结构,提出交叉口群交通信号动态协调控制方法与关键技术,并开发相应的控制应用软件。

全书共分 10 章:第 1 章绪论,第 2 章交叉口群交通信息分析与预测,第 3 章交叉口群路径交通关联特征,第 4 章基于元胞传输模型的交叉口群交通流建模,第 5 章交叉口群交通动态协调控制系统结构设计,第 6 章交叉口群信号协调控制范围动态界定,第 7 章基于阻塞流理论的交叉口群网络防阻塞运行控制,第 8 章面向主路径协调控制的交叉口群时空资源综合优化,第 9 章交叉口群信号协调控制配时参数在线调整,第 10 章交叉口群交通动态协调控制软件开发。

本书在撰写过程中参阅了国内外大量文献与著作,由于条件所限未能与原著者一一取得联系,引用及理解不当之处敬请见谅,在此谨向这些资料的原著者表达崇高的敬意和由衷的感谢!

限于作者的时间和水平所限,书中难免有错漏之处,恳请读者批评指正。

**著 者**

于东南大学

2013年9月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 区域交通信号协调控制系统开发概况 .....	3
1.3 信号控制交叉口群交通管理与控制相关研究综述 .....	10
1.4 研究框架及内容 .....	18
1.5 技术路线 .....	22
1.6 本章小结 .....	24
<b>第 2 章 交叉口群交通信息分析与预测</b> .....	25
2.1 交通流量信息相似性分析 .....	25
2.2 行程时间差异性比较 .....	35
2.3 交通信息短时预测模型 .....	41
2.4 本章小结 .....	50
<b>第 3 章 交叉口群路径交通关联特征</b> .....	51
3.1 相邻交叉口交通关联特征 .....	51
3.2 交叉口群交通关联特征分析 .....	55
3.3 交叉口群路径关联度计算模型 .....	67
3.4 本章小结 .....	75
<b>第 4 章 基于元胞传输模型的交叉口群交通流建模</b> .....	76
4.1 元胞传输模型 .....	76
4.2 对元胞传输模型的改进 .....	87
4.3 算例分析 .....	90
4.4 本章小结 .....	94

<b>第 5 章 交叉口群交通动态协调控制系统结构设计</b> .....	95
5.1 动态协调控制策略集合 .....	95
5.2 动态协调控制策略适用环境 .....	98
5.3 基于 Multi-Agent 的协调控制模式 .....	100
5.4 动态协调控制系统 Agent 结构设计 .....	105
5.5 动态协调控制系统实施关键模块 .....	107
5.6 本章小结 .....	109
<b>第 6 章 交叉口群信号协调控制范围动态界定</b> .....	110
6.1 区域信号协调控制中的子区动态划分 .....	110
6.2 交叉口群信号协调控制范围界定流程 .....	115
6.3 基于 SOM 的交叉口群范围界定方法 .....	118
6.4 算例分析 .....	123
6.5 本章小结 .....	129
<b>第 7 章 基于阻塞流理论的交叉口群网络防阻塞运行控制</b> .....	130
7.1 交通网络流量均衡理论概述 .....	130
7.2 阻塞流理论基础 .....	133
7.3 不同路径选择情形下的网络随机流动仿真实验 .....	135
7.4 最小流控制策略 .....	144
7.5 最大流控制策略 .....	148
7.6 本章小结 .....	150
<b>第 8 章 面向主路径协调控制的交叉口群时空资源综合优化</b> .....	151
8.1 交叉口空间布局与信号配时综合优化思路 .....	151
8.2 模型构建 .....	155
8.3 模型求解 .....	161
8.4 算例分析 .....	163
8.5 本章小结 .....	172
<b>第 9 章 交叉口群信号协调控制配时参数在线调整</b> .....	173
9.1 多相位交叉口动态协调控制关键问题 .....	173
9.2 基于模糊理论的交叉口群绿信比调整 .....	177
9.3 绿信比调整影响下的主路径相位差优化 .....	188

9.4 本章小结 .....	193
<b>第 10 章 交叉口群交通动态协调控制软件开发 .....</b>	<b>194</b>
10.1 UTCInG 功能概述 .....	194
10.2 UTCInG 处理流程及体系结构 .....	195
10.3 UTCInG 系统设计 .....	198
10.4 软件测试 .....	205
10.5 本章小结 .....	206
<b>参考文献 .....</b>	<b>207</b>
<b>后记 .....</b>	<b>219</b>



# 第1章

## 绪论

### 1.1 研究背景

城市化、工业化进程的加快以及社会经济的持续稳定发展使得城市交通需求显著增长,车辆的急剧增加给我国城市交通系统带来了巨大的压力,城市的发展难以提供与交通需求增长相适应的道路基础设施,由此造成日益严重的城市交通拥挤。在交通拥堵的形成过程中,常常可以观察到这样的现象:交通拥挤的产生最初多是只在一个路段上,而非整个交叉口各方向都产生拥堵,车辆在该路段上排队,排队向上游延续,影响上游交叉口流入该路段的方向时产生继发性拥挤。原发性拥挤持续时间较长,或随着交通需求的增长,原发性拥挤所在交叉口和继发性拥挤所在交叉口的平衡被打破,有可能导致交叉口其他方向也产生拥挤,最后会在局部路网形成饱和循环<sup>[1]</sup>。因此,仅仅从交通设施如道路或交叉口本身来考虑交通拥堵治理问题远远不够,需要从交通网络系统层面深入分析和理解系统中各要素的相互作用和运作机理,以紧密联系的交叉口所构成的交叉口群为切入点治理城市交通拥堵问题。

城市道路交叉口群为城市道路网中地理位置相邻且存在较强关联性的若干交叉口的集合<sup>[2]</sup>。其概念的提出,最早是基于交叉口协调控制的需要。随着研究的深入,交叉口群的内涵和外延得到不断的拓展。从拓扑结构上看,交叉口群一般具有小间距、高密度的特点,网络规模较小,次干路、支路所占比例较高,因此交通需求与车辆运行表现出如下特征:

① 交通需求内生性强,集聚力高。一般而言,随着土地利用开发强度的提高,人流与物流需求同步增长,该区域的路网密度也迅速增大,而交通的便利也促进土地利用的进一步开发。交叉口群具有较高的路网密度,大多都位于城市中心区域,人口与就业岗位高度集聚,辐射力强,出行量大,是交通拥挤的常发区域。

② 网络连通度好,车流路径选择灵活度高。在交叉口群范围内,任意两个结

点之间至少存在一条路径连接,当某条路径因交通拥堵、交通管制或物理结构损坏发生中断时,至少有一条替代路径,适宜单行线、禁止左转等交通分流措施的应用。

③ 交叉口间距短,车流脉冲式到达特征明显。不同于公路(特别是高速公路)的连续交通流特征,城市道路上的间断交通流有其独特性:由于红灯期间交叉口对车流的挤压作用,车流呈组团行驶状态,同时由于车流组团中车辆行驶特性的差别,车辆驶出交叉口后,又具有独特的离散现象<sup>[3]</sup>。交叉口间距越大,离散现象越明显。交叉口群交叉口间距普遍较短,车流呈组团行驶状态突出,适宜“绿波交通”的组织。

④ 道路等级差异性小,网络负荷分布较均匀。一般而言,城市快速路交叉口间距为 1 500~2 000 m,主干路为 700~1 200 m,次干路为 350~700 m,支路为 150~250 m。交叉口群范围内除个别情况下有主干路穿过外,以次干路与支路为主,干道交通流特征不明显,难以直观地发现交通主流向的分布,宜根据交通运行的实时状态判断交通协调控制的优先级别。

城市道路交通问题是人、车、路三要素的矛盾在城市时空范围内的表象,其核心问题是在一定的资源约束条件下,如何满足广泛的交通需求和保持优质的交通服务水平<sup>[4]</sup>。交叉口群中的各个交叉口空间距离一般不大,在拥堵状态下经常会出现交叉口群中的两个关联交叉口之间的路段长度不能容纳足够排队车辆而溢出现象,进而导致交通运行失稳,甚至出现路网交通流相互锁死致使交通大面积瘫痪等问题。由此可见虽然交叉口群只是城市路网的一小部分,但因其特殊特性使其成为城市路网的关键“瓶颈”,是产生拥堵的重要原因。目前运用交通控制手段治理交叉口群拥堵问题一般有两种思路:一是选择交叉口群内的关键交叉口,考虑上、下游交叉口的影响,对其进行交通设计优化以提升单点信号交叉口的通行能力;二是选择在交叉口群内交通流运行的主路径,类似干道绿波组织,对该路径途经的各交叉口进行协调控制,以使主体车队尽快通过交叉口群,进而提升交叉口群的整体运行效率。两者均是为了避免交叉口群范围内某个交叉口或某条路径成为路网运行的薄弱环节,但基于交通路径控制的思路能较为有效地协调交叉口与路段的通行能力,使之相匹配,故逐渐成为研究的热点方向。

交叉口群交通主路径的识别是采取基于路径的交通协调控制的前提。定义交叉口群交通主路径为交叉口间关联度高且对交叉口群网络整体运行效益起决定作用的路径。交叉口群中各交叉口交通关联性的强弱主要表现在交叉口间车队集聚状态的维系程度,即下游交叉口的到达车流特性与上游车流特性具有相似性,这种相似性在交通主路径上表现更为明显。一旦关联交叉口群中上游交叉口因交通信号控制或交通拥堵引起流量、车速等交通流参数变化,交通流参数的短时变化特性可保持至下游交叉口。城市交通系统具有复杂性、动态性及随机性特征,某条路径

上交通流的生成受区域范围内用地性质、基本路况、交通管制措施、出行者个人偏好等诸多因素影响。虽然是大量随机的独立个体出行组成了交叉口群的车流主流向,但从集计的观测尺度看,出行行为的选择仍要受到地点、时间、社会以及经济的影响,路径上交通流的统计特征表现出较强的确定性。因此,为实现交叉口群“时间”、“空间”、“车流”三者的协调,对交叉口群关联特性进行分析并确定协调控制范围,将路径上、下游交通流参数的变化特性作为依据,建立模型识别车流分布特征,进而采取适宜的设计、管理与控制手段实现时空资源的高效利用,具有一定的可行性。

本书以城市道路信号控制交叉口群为研究对象,从交叉口群层面提出有效实现“时间”、“空间”、“车流”三者之间的动态协调控制方法。通过分析交叉口群交通信息及关联特征,建立交叉口群交通流模型,设计交叉口群交通动态协调控制系统结构,研究各功能实现模块的关键方法与技术,并对交通控制软件进行开发。该研究对于提高城市路网容量与服务水平,缓解交通拥堵,减少交通污染,节约能源消耗,建立安全、顺畅、低碳、经济的城市交通系统具有重要的意义。

## 1.2 区域交通信号协调控制系统开发概况

### 1.2.1 国外交通信号控制系统开发概况

自20世纪20年代交通信号灯控制器被用于控制交通流开始,国外众多学者对区域交通信号协调控制系统进行分析、建模、仿真及优化研究,并研发出了多种信号控制系统。以下以时间先后为序对主要研究成果进行综述。

#### (1) 20世纪50年代至60年代

最初安装信号灯主要用于避免交叉口各个冲突方向车辆的碰撞,后来逐步延伸到以减小车辆通过交叉口的延误时间为目的。Webster(1958)提出了延误的估算公式<sup>[5]</sup>,是早期最为重要的研究成果之一。基于该延误公式,Webster以调节绿信比为手段,对单个交叉口的延误最小化问题进行研究。

到20世纪60年代,交叉口信号控制的研究范围逐渐扩展至城市干道及交通网络。Newell(1963)对于干道某一方向的交通流密度进行假设后建立了宏观分析模型,认为将相邻的两个交叉口进行信号协调控制可以得到较好的控制效果<sup>[6]</sup>。Morgan和Little(1964,1966)随后首次引入混合整数线性规划模型对实现干道绿波带最大化建立了优化模型<sup>[7,8]</sup>。在该方法中,研究者考虑双向绿波带的设置对相位差、公用周期、通过带车速进行了优化调整。到60年代中期,英国格拉斯哥市成为首个对城市路网采用信号协调控制的地区。在这项实验中,项目的执行者Hillier(1965,1966)对城市交通控制子区采用了不同的信号控制方案并进行评

估<sup>[9, 10]</sup>。Hiller 和 Rothery(1967)又研究了车队离散和信号协调控制的相互关系,调查了伦敦的四个信号控制交叉口,从中分析相位差设置对总延误的影响<sup>[11]</sup>。Allsop(1968)以延误最小化为优化目标,基于图论建立了一种迭代算法,通过逐步扩展控制子区的范围寻找协调控制的最优解<sup>[12]</sup>。

英国道路运输研究所(TRRL, 20世纪90年代改名为TRL)的Robertson(1969)提出了一套脱机优化网络信号配时方法<sup>[13]</sup>,通过工程实践被不断改进完善,形成了目前被广泛应用的TRANSYT(Traffic Network Study Tool)系统。在TRANSYT系统中,针对路网与交通流运行状况进行了三项基本假设:网络中所有主要交叉口均由信号灯控制;所有交叉口均采用一个共同的信号控制周期时长,或者公用周期长度的一半作为其信号周期;每一股独立的直行或转向车流的流率为已知,且假定为常量。系统有两个重要组成部分:仿真模型和优化计算。在仿真模型中,系统首先将网络的几何尺寸、交通流信息及初始交通信号参数输入系统,通过模拟信号控制下交通路网中的车辆行驶状况,计算在一组给定的信号配时方案作用下网络的运行指标,即PI(Performance Index)值,作为优化控制参数的目标函数。在优化计算中改变信号配时参数并确定指标是否减小,采用“爬山法”求得最优配时方案。

在该阶段电子计算机的广泛应用为交通网络中多个交叉口的信号自动协调控制提供了技术条件,是城市交通区域信号协调控制的起步阶段。配时方案大多由离线分析程序得到并储存在计算机内存中,以TRANSYT为代表区域定时控制系统已初步成型并应用于实际路网。

## (2) 20世纪70年代至80年代

20世纪70年代,在Gartner(1972, 1975)的一系列研究成果中提出了混合整数线性规划模型,通过对相位差的调整实现对网络延误的最小化控制<sup>[14~16]</sup>。与此同时, Antoniadis也研究了线性规划模型应用于交通网络信号配时的可行性,但他所提出的模型中并没有考虑相位差的影响<sup>[17]</sup>。Improta和Sforza(1982)基于Gartner的研究成果对混合整数线性规划模型进行了改进,采用分枝法和回溯法对Gartner模型中针对延误的假设进行了改良<sup>[18]</sup>。,最早版本的OPAC(Optimization Policies for Adaptive Control)系统即基于Gartner等人的系列研究成果于1979年完成,该系统引入虚拟定周期VFC(Virtual Fixed Cycle)的概念,允许每个交叉口的周期长度在规定的时间与空间范围内变化,为两路口间绿波带的调整保留了一定的协调空间。OPAC系统是一个分布式的系统,最底层在VFC的约束下,对绿信比进行优化,中间层对相位差优化,最上层进行信号同步,寻找最优的VFC。在此后20余年OPAC系统不断升级版本,1996年在对美国新泽西州18号公路的现场测试中取得了满意效果,实验结果表明OPAC系统对饱和度较高的交通干线控

制效果非常显著<sup>[19~21]</sup>。

澳大利亚道路运输部(DMR)于20世纪70年代开始开发SCATS(Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)系统,80年代初投入使用。该系统属于一种方案选择式优选配时方案(战略控制(Strategic Control))与本地感应控制作调整(战术控制(Tactical Control))相结合的双层控制系统。通过上、下层的有机结合,节省了计算机的CPU时间。该系统未像TRANSYT一样采用交通模型,而是根据交通状况实时选择交通控制参数组合,并对参数做适当修正。虽然不一定能获得配时参数的最优解,但把周期时长、绿信比和相位差作为各自独立的参数分别优化,提高了系统的运算效率。在优化过程中,以参数综合流量及类饱和度为主要依据。类饱和度反映了车流有效利用的绿灯时间与绿灯显示时间之间的比值;综合流量把一次绿灯时间通过停车线的车辆折算为当量,反映了通过停车线的混合车流的数量。优化的目标为使各相位的类饱和度维持在大致相等的水平<sup>[22]</sup>。

Dauscha(1985)研究了区域信号控制中依据交通流运行状态对控制方案进行周期性选择的实施框架,首次深入研究了区域信号协调控制方案周期性变化的复杂性<sup>[23]</sup>。随后,Serafini和Ukovich(1989)基于理论模型为区域定时信号协调控制系统研究了一套控制方法,与Dauscha的研究相类似,延续了分阶段配时设计思路<sup>[24]</sup>。

同年,由意大利Mizar Automazione公司开发的UTOPIA(Urban Traffic Optimization by Integrated Automation)/SPOT(System for Priority and Optimization of Traffic)系统被应用于都灵市中心包含约40个交叉口的交通网络中。在该系统中,UTOPIA的优化过程以历史数据为基础,建立宏观交通模型,是较为高级的区域控制;SPOT利用本地的信号控制机和区域模型的数据优化单个路口控制。SPOT系统的管理交叉口一般不超过6个,以考虑了停车次数、延误、剩余通行能力等综合效益的总费用函数最小为目标,采用“强相互作用”概念,即目标函数的优化需要考虑相邻SPOT单元的交通状态。UTOPIA/SPOT系统另一个显著的特点是在设计和开发过程中考虑了公交优先的功能,将公交车辆在路口的损失时间赋予最大权重,然后对优化目标求解<sup>[25]</sup>。在此后研发的控制系统中如法国的PROLYN系统<sup>[26]</sup>和德国的MOTION系统<sup>[27, 28]</sup>均具有类似功能。

TRL在20世纪80年代设计了MOVA(Microprocessor Optimized Vehicle Actuation)系统,该系统能针对不同情况应用不同的控制原理。当交叉口处于非饱和状态时,采用最小化延误的处理过程;通过车辆排队情况检测是否发生过饱和现象,如果有任何一个进口道转变为饱和状态,系统转换至通行能力最大的处理过程。但MOVA是针对独立交叉口设计的,只有当相邻交叉口因为距离太近而不能独立处理时,可通过MOVA将两个或更多的交叉口加以关联。

在该阶段研究者关注于包括方案选择式系统、方案生成式系统及本地自适应系统的开发,控制系统自动化生成配时方案并检测预先设置的方案是否需要修改,SCATS系统是期间最具典型性的代表。此外,面向公交优先以及过饱和交通状态下的信号控制方法也开始逐步引起研究者的关注。

### (3) 20世纪90年代至今

该阶段的发展特征是交通控制系统基于车辆检测器的检测数据在线实时生成控制方案并通过在线技术进行方案的实施,根据实施数据5~10 min更新控制方案,其中以SCOOT系统的开发最为成功,目前在全球超过170个城市获得了应用<sup>[4]</sup>。

SCOOT(Split-Cycle-Offset Optimization Technique)系统是由TRL在TRANSYT系统基础上研制的自适应控制系统,20世纪90年代进行了多次升级。Robertson和Bretherton(1991)系统介绍了SCOOT系统的在线优化原理<sup>[29]</sup>。该系统通过安装在各交叉口进口道上游的检测器采集到的车辆到达信息,联机处理生成信号控制方案,实时、连续地对周期、绿信比、相位差进行调整,使之与不断变化的交通流状况相适应。绿信比的优化目标是使各相位交通流的饱和度尽可能小;相位差的优化是使延误和停车次数最少,并尽可能减少阻塞;周期优化的目标是将子区内负荷最高的关键交叉口饱和度控制在90%。其交通模型包括交通环境、交通过程和交通预测三部分。交通环境包括控制区域的道路网络结构、参数以及检测器位置,反映模型的基本几何结构。交通参数描述交通过程,如相位相序、绿灯时间间隔、最大或最小绿灯、车辆在各路段上的行驶时间、饱和占有率等,这些数据均为静态数据,预先储存在SCOOT系统中。交通环境和交通过程服务于交通预测,交通预测是形成配时参数的最直接来源。近年来SCOOT系统新增了信息数据库ASTRID(Automatic SCOOT Traffic Information Database)模块和综合事故检测INGRID(Integrated Incident Detection)模块,SCOOT MC3(Managing Congestion, Communications and Control)又增加了通信、拥堵控制、公交优先和行人设施管理功能。系统的不足反映在交通模型的建立需要大量的道路几何尺寸与交通流数据、相位不能自动增减、相序无法自动改变、无法独立划分控制子区、参数的校核不能自动化、现场安装调试较为复杂等。

随着智能交通系统的发展,人工智能技术在信号控制系统中的应用也不断拓展。Hassin(1996)针对区域定时信号控制提出了一种基于流量模型的配时方法,该方法采用启发式算法求解局部最优特征解,在以色列Tel Aviv市的城市道路网络协调控制中实施应用,并与其他采用启发式算法的系统如TRANSYT等进行对比分析<sup>[30]</sup>。Almasri和Friedrich(2005)依据Daganzo(1994, 1995)的元胞传输模型<sup>[31, 32]</sup>提出了基于遗传算法的启发式优化方法,对区域交通网络的自适应控制系

统进行了研究<sup>[33]</sup>。Braun 和 Weichenmeier(2005)也引入二阶启发式方法,对相位差等参数进行优化并采用遗传算法求解,但实验结果仅能应用于小规模网络<sup>[34]</sup>。交通网络信号协调控制的建模及优化问题也激发了其他领域专家的研究兴趣,如 Ianigro(1994)使用 Petri 网络建立交通模型,并通过仿真手段寻找信号参数的最优设置<sup>[35]</sup>。Gershenson(2005)的研究中认为信号控制交通网络为一个自组织系统,他对适应环境变化的自组织信号配时进行了研究<sup>[36]</sup>。

在区域交通信号控制系统的开发及应用中,人工智能技术也得到了广泛应用。TUC(Traffic-responsive Urban Control)策略在 1998 年欧洲的 TABASCO(Telematics Applications in Bavaria, Scotland and Others)项目中开发完成。该策略采用“存储-转发”(Store and Forward)的建模方法,以避免对信号灯转换时二进制变量造成的复杂度出现指数型增长,并采用简洁、高效的二次线性规划方法对多变量进行调节。通过反馈控制技术,在不使用理想模型和不牺牲效率的前提下简化了计算。TUC 策略能够应对饱和和交通状况,通过内置的“门控行为”(Gating Behavior)避免路段出现过饱和情况,倾向于降低与饱和路段相连的路段的绿灯时长,避免绿灯时间的浪费和大面积交通拥挤的产生。控制方案包含公交优先 PTP(Public Transportation Priority)控制模块,启动后能够提供不同的公交优先控制的等级和方法<sup>[37]</sup>。

CRONOS(Control of Networks by Optimization of Swithovers)系统由 20 世纪 90 年代法国国家运输与安全研究所(INRETS)开发,其目标是使包含几个交叉路口的控制小区的延误最小。在给定当前的信号控制条件下,优化模块在使性能指标最小的情况下寻找下一个步长的最优信号控制方案。优化算法建立在改进的 Box 算法基础上,该算法对所有可能的信号配时方案进行连续搜索,每次搜索完毕后对最大值方案进行修改,直到算法收敛。对于控制范围内的交叉口数量而言,Box 算法的优点在于能够快速找到局部最小值,其他很多算法是指数级的时间复杂度,而该算法具有多项式时间复杂度<sup>[38, 39]</sup>。

1996 年开发成功并陆续在美国亚利桑那州进行现场测试的 RHODES(Real-time, Hierarchical, Optimized, Distributed, and Effective System)系统把系统控制问题分解为三层递阶结构:网络负荷分配层、网络控制层和交叉口控制层。网络负荷分配层采用先进的出行者信息系统和动态交通分配技术进行网络总的交通需求预测。网络控制层由网络流预测模型 APRES-NET(Approximate Prediction in Response to a Signal Network)和优化模型 REALBAND 构成。APRES-NET 根据预测的交通流量、未来的信号配时方案和统计的交通流数据对车队情况进行预测;优化算法 REALBAND 用决策树法对网络交通信号进行协调优化并生成绿波带,使延误和停车次数最少。交叉口控制层由控制参数优化模块 COP(Controlled

Optimization of Phases)及流向流量预测模块 PREDICT 构成,根据检测数据及约束条件进行交通流预测,以秒为单位,对相位和绿信比进行控制。其中 COP 采用动态规划的方法找出单个交叉口的最优相序和相位长度<sup>[40]</sup>。

### 1.2.2 国内交通信号控制系统开发概况

我国在城市交通控制系统方面的研究工作起步相对较晚,20世纪70年代后期北京市开始采用 DJS-130 型计算机进行干线协调控制研究。进入20世纪80年代以来,国家一方面采取开发与引进相结合的方法,另一方面不断改善以城市中心区交通为核心的交通信号控制系统,开发适应我国交通特色的区域交通信号协调控制系统。

南京 NATS 城市交通信号控制系统是我国自主研制开发的第一个实时自适应交通信号控制系统,适合我国混合交通流环境以及路网密度低、交叉口间距悬殊的道路交通环境。该系统具备实时自适应优化、定时控制、联机线控三种主要的控制方式,采用三级分布式递阶控制结构,设置中心控制级、区域控制级与交叉口控制级<sup>[41]</sup>。系统优化软件通过车辆检测器实时检测机动车和非机动车的信息,运用交通模型预测停车线车辆到达和排队情况,计算和调整饱和度,以减少行车延误、停车次数为主要目标建立函数,结合道路交通特点、按小步距逐步寻优的原则,对周期、绿信比、相位差等控制参数进行优化,构成全局优化的实时自适应优化软件<sup>[42]</sup>。同时系统还配备了交通疏导广播、可变情报板等,为车辆提供实时的交通信息。

海信 HiCon 交通信号控制系统是一套包括交叉口信号控制机、通信服务器到区域控制服务器、中央控制服务器的整套解决方案。交叉口信号机采集交通流量、时间占有率、速度等信息,控制中心根据实时的交通状况进行决策,对配时参数实时调整优化,以减少车辆及行人的等待时间。区域协调控制目标是实现高峰时段最大的路网通行能力、平峰时段最小的车辆停车延误、低峰时段最少的停车次数<sup>[43]</sup>。此外,HiCon 系统还考虑了行人通行的需求,可实现特定警卫线路车辆的优先通过<sup>[44]</sup>。

深圳市的 SMOOTH 智能交通信号控制系统采用了由“中央控制管理系统—信号控制机—车辆检测器”组成的分布式控制模式。系统将交通状态划分为闲散、自由、受控、拥挤、堵塞、队列六种不同负荷情况,单点交叉口在全感应、半感应、行人感应及多段定时控制的基础上,实现基于交通状态识别的多目标决策控制策略的动态优化功能;中央控制系统以子区内及子区间连线上双向或单向绿波通过带宽最大为目标,匹配各交叉口的控制周期要求,生成子区和各子区的公用周期,动态决策相位差参数,实现多相位条件下的协调控制<sup>[45]</sup>。



此外,吉林大学杨兆升教授团队对大范围战略交通控制系统框架结构、多源交通决策信息融合与交通状态判别技术、大范围战略交通控制模型和算法等进行了深入研究,构建了适合我国国情的新一代智能化交通控制系统(Novel Intelligent Traffic Control System,简称 NITCS)<sup>[1, 46~57]</sup>。该系统采用大系统智能控制与分层动态递阶协调的思想,以大范围战略协调控制级作为中央协调优化中心,实现大范围的宽稳态协调控制,满足特大城市城市路网控制结点实施统一协调优化控制的需求。同济大学杨晓光教授团队研发了面向 ITS、适用于中国城市交通特点的实时自适应交通控制与管理系统(TongJi Advance Traffic Control and Management System,简称 TJATCMS)<sup>[58, 59]</sup>。该系统的基本功能是为满足单点及区域信号协调控制、混合交通流控制、连续交通流与间断交通流真核控制、公交优先控制及行人过街智能化控制的要求,对单点实时自适应控制算法、最大绿波带、总延误和停车次数最小化算法、人均延误和停车次数最小化算法、连续流与间断流协调控制算法等进行了研究,采用实时计算与脱线计算相结合的优化方法。天津大学贺国光教授团队将智能控制原理应用于交通控制系统中,研制了城市交通智能式实时控制系统(Urban Traffic Intelligent Real-Time Control System,简称 TICS)。该系统是一种基于知识的自学习智能控制系统,知识库中的知识由 TICS 不断自主学习生成并更新<sup>[60]</sup>。

虽然我国自主研发的城市交通控制系统已有一定的成果,但其整体性能与国外同类系统相比仍有较大的差距,其可靠性、灵活性、兼容性、扩展性等方面还有待进一步提高,有必要拓展新的思路来实现整个区域交通流的协调与控制。

### 1.2.3 区域交通信号协调控制系统发展趋势

纵观国内外的区域交通信号控制系统的发展历史,可以看出近年来在交通信号协调控制系统的研究中呈现出以下几个特点:

① 变被动适应调节为主动自适应调节。既有的区域交通控制系统多是通过预先调查或实时自动检测,获取交通流的变化规律及实时状态,以此为基础选择或在线生成适当的控制方案,使之适应交通流的变化需求。在本质上信号控制方案是依据交通需求的变化而变化,采用的是被动式的控制思想。从主动自适应的控制思想出发,是希望能够通过信号控制方案实现对网络交通流的主动控制,使交通流能够按照管理者的意愿运行,从而均衡网络的交通负荷,避免瓶颈区域的形成。

② 智能控制技术广泛应用。在对区域交通信号配时参数优化中,最初的优化计算以数学解析为主,但由于交通系统本身的复杂性、非线性以及过多的人为假设等因素,影响了优化的效果。随着智能控制理论的发展,神经网络、模糊控制、遗传算法、Multi-Agent 系统等理论与技术在协调控制参数配时的优化计算中得到了广