

分类号 U491

密 级 GK



学位代码 308

学校代码 10298

学 号 3090413

南京林业大学

研究生硕士学位论文

论文题目：城市主干道绿波带控制适用性研究

作 者：徐伯寅

专 业：交通运输规划与管理

研究方向：城市与区域交通规划

指导教师：何宁 教授

二〇一二年六月

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行的研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经特别注明引用的内容和致谢的地方外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明并表示感谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（本人签名）：徐伯寅 2012 年 6 月 15 日

学位论文出版授权书

本人及导师完全同意《中国博士学位论文全文数据库出版章程》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库出版章程》（以下简称“章程”，见 www.cnki.net），愿意将本人的学位论文提交“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”在《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》中全文发表和以电子、网络形式公开出版，并同意编入 CNKI《中国知识资源总库》，在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联网上传播，同意按“章程”规定享受相关权益。

论文密级：

☒ 公开 ☐ 保密（___ 年 ___ 月至 ___ 年 ___ 月）（保密的学位论文在解密后应遵守此协议）

作者签名：徐伯寅

2012 年 6 月 15 日

导师签名：[Signature]

2012 年 6 月 15 日

致 谢

三年的研究生学习生涯承载了太多美好回忆，得到了太多的关心、鼓励和帮助，感激之情无以言表。

本论文是在我的导师何宁教授的严格要求和悉心指导下完成的。从论文的选题、撰写到修改、润色，何老师都倾注了大量的心血和精力。在三年的学习和实践期间，导师以其渊博的学识、敏捷的思维、严谨的治学态度，以及广阔的胸怀、热忱的为人深深地感染着我，这些宝贵的财富将使我终身受益。在此向我尊敬的导师何宁教授表示最衷心的感谢！

感谢南京市城市与交通规划设计研究院杨涛教授、钱林波教授，王轼、顾克东、王国晓、吕庆礼所长，倪换来、施泉、史桂芳等工程师，在项目实践及论文写作过程中给我的指导和帮助！同时，感谢南京市城交院的所有其他员工给予我的帮助！

感谢南京市公安局交通管理局顾怀中所长在论文撰写过程中给予我的指点和帮助，在此致以诚挚的谢意！

此外还要特别感谢南京林业大学汽车与交通工程学院马健霄教授、林丽副教授、韩宝睿副教授、邬岚等老师在学业上的帮助和支持，使我顺利完成了学业！

感谢各位师兄师姐、师弟师妹以及同学朋友在学习和生活中对我的关心和帮助，与他们一起度过三年充实愉快的学习生活，并留下了珍贵美好的回忆，在此表示深深的感谢！

最后，我要感谢我的父母！家人多年来他们的理解和全力支持，使我顺利完成学业！

摘要

随着城市化进程的加快及机动车辆人均拥有率的增加,城市交通问题已成为影响社会进步的热点及难点问题。而城市主干道作为城市交通网络中车辆通行的大动脉,承担着车辆流通的重担。因此,在解决城市交通阻塞问题中,重中之重的是提高干线上车辆的通行能力,减少车辆的阻塞次数。由于地理资源和资金的限制,尚难以通过道路的大量投资建设,来满足城市交通发展的需要。因此,提高现有道路的通行能力成为解决城市道路设施负担过重的突破点。

本文针对现代交通中干线协调控制的问题,对城市主干道双向绿波带控制优化进行了研究,主要工作如下:

(1) 讨论了双向绿波的概念和控制目标,依据对交通控制中的性能指标分析建立了双向绿波的模型,通过讨论多目标优化的基本概念和基本原理,对建立的双向绿波的模型分析,给出了延误和停车率等优化目标。然后利用粒子群优化算法(PSO)对建立的多目标的模型进行优化,给出优化设计的基本步骤的描述。

(2) 讨论在城市主干道中交通流量采集交通信息检测器的布局,针对不同的交通道路情况对交通信息检测器的合理布局进行讨论,以很好地采集干线的交通流量和采集精确的交通信号参数,综合所讨论的因素给出了交通信息检测器布局的整体思路。

(3) 结合南京市白下路沿线两个相邻路口的实例,对绿波控制优化方案的各项评价指标进行了分析,验证了算法的有效性和可行性。

关键词: 绿波带, 粒子群算法, 交通信息检测器布局

Research of Applicability of Green-Wave in the main road

Abstract

With the acceleration of the process of urbanization and the increasing ownership of vehicles, the issue of transportation has become a thorny and difficult problem in urban. As the city traffic artery of traffic network, urban bone road take the great role in the traffic flow. To solve the urban traffic problem, the most importance is to improve the capacity of the skeleton route, to reduce the number of vehicles blocking. Owing to geography resources and the funds limit, to satisfy the needs of municipal transportation is hard to implementation just by big investing in traffic construction still. Therefore, improving the capacity of delivery vehicles about the existing traffic line become the breakthrough point of solves overburdened of the urban road facility.

On the basis of analyzing the problems of traffic signal coordinated of trunk, the thesis makes a study on optimal control of dynamic Bidirectional Green-Wave. The research mainly includes several parts as follows:

Some discussions on the concept and target of Bidirectional Green-Wave are done, and the models of Bidirectional Green-Wave are constructed by the analysis of the property indexes in traffic control, also the thesis makes the study on the models of Bidirectional Green-Wave and the basic concepts and principles of multi-objective optimization. In the end, the optimization objectives-delays and parking rates are given. After the above discussion, the thesis optimizes the models of multi-objective by Particle Swarm Optimization(PSO), and gives the detail description of basic optimal steps.

Secondly, the thesis discussed the layout of traffic acquisition sensors in the main road. On condition of the different roads, this thesis give some discussions on the reasonable layout of traffic acquisition sensors to have a good collection of accurate traffic parameters and traffic signals in the main road. And the whole ideas about the layout of traffic acquisition sensors are given.

Thirdly, taking as the research background of two adjacent intersections of Baixia Road, Nanjing, the optimization control scheme of Green-Wave are analyzed, which proves the method is efficiency and feasible.

Keywords: Green-Wave; Particle Swarm Optimization(PSO);
Layout of traffic acquisition sensors;

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	4
1.2.3 存在问题.....	5
1.3 本文的研究内容和结构编排	5
2 城市交通信号控制基本理论.....	7
2.1 城市交通信号控制的基本概念和控制参数	7
2.1.1 基本概念.....	7
2.1.2 控制与评价参数.....	8
2.2 城市交通信号控制的评价指标	10
2.3 城市交通信号控制的基本类型	11
2.3.1 按控制范围分类.....	11
2.3.2 按控制策略分类.....	12
2.3.3 按控制结构分类.....	12
2.4 小结	13
3 城市主干道绿波带控制原理	14
3.1 城市交通干线协调控制分析.....	14
3.1.1 城市交通干线系统的基本描述	14
3.1.2 城市交通干线系统协调控制的方式	14
3.1.3 城市交通干线系统的协调控制目标	16
3.1.4 城市交通干线系统协调控制系统	16
3.2 绿波带控制基本原理	18
3.2.1 绿波概念	18
3.2.2 绿波的类型	20
3.2.3 绿波带控制的约束条件	20
3.3 绿波带设计方案	21
3.3.1 绿波带设计空间要求	21
3.3.2 绿波带配时设计方法	22
3.3.2.1 图解法.....	22
3.3.2.2 数解法.....	22
3.3.3 绿波带控制中的辅助信号设计	23
3.3.4 绿波带信号控制方案的切换	24
3.4 小结	27
4 绿波带控制优化研究	28
4.1 多目标优化基本概念.....	28

4.2	粒子群优化算法的基本理论.....	29
4.2.1	粒子群优化算法的原理.....	30
4.2.2	粒子群优化算法的步骤.....	30
4.2.3	粒子群优化算法的特点.....	30
4.3	绿波带控制优化.....	31
4.3.1	前提假设条件.....	31
4.3.2	绿波带控制模型的建立.....	31
4.3.2.1	平均延误.....	32
4.3.2.2	排队长度.....	39
4.3.2.3	停车率.....	40
4.3.2.4	绿波带控制模型建立.....	42
4.3.3	优化目标的建立.....	43
4.3.4	目标函数的粒子群优化.....	44
4.4	小结.....	47
5	交通信息的获取及其绿波带反馈控制.....	48
5.1	常用交通信息检测器.....	48
5.1.1	移动式交通信息获取.....	48
5.1.2	固定式交通信息获取.....	49
5.1.3	基础交通信息采集.....	50
5.2	交通干线交叉口分类及导流.....	51
5.3	交通信息检测器布局研究.....	54
5.3.1	交通信息检测器布设影响因素分析.....	54
5.3.2	交通信息检测器设置方法优化.....	56
5.4	无检测器交叉口交通信息的获取.....	57
5.4.1	邻近交叉口关联分析方法.....	58
5.4.2	移动+固定检测融合方法.....	59
5.5	绿波带时差的反馈控制.....	61
5.6	小结.....	63
6	仿真实例分析.....	64
6.1	调研准备.....	64
6.2	现状分析.....	64
6.3	流量统计.....	65
6.4	现行交叉口绿波协同控制方案.....	65
6.5	实验结果及其分析.....	66
6.6	小结.....	68
7	总结.....	69
7.1	研究结论.....	69
7.2	研究展望.....	69
	参考文献.....	70

1 绪论

1.1 研究背景

随着城市化速度的加快,机动车日益普及,人们在享受机动车所带来的巨大便利的同时,也面临着交通拥挤的困惑。交通拥挤严重,将会导致出行者出行时间增加、车辆能源消耗加大、空气污染和噪声污染程度日益加深等诸多问题。据统计,交通拥挤问题每年给世界各国造成巨大的经济损失。美国德州运输研究所对美国39个主要城市的研究,估计美国每年因交通堵塞造成的经济损失约为410亿美元,12个最大城市每年的损失超过10亿美元^[1];由于交通堵塞,日本东京都的专业运输成本1985年与1980年比,年度成本增加842亿日元,每年因交通拥挤造成交通参与者的时间损失相当于123,000亿日元;而欧洲每年因交通事故、交通拥挤和环境污染造成的经济损失分别为500亿欧元、5000亿欧元和50亿欧元。在国内,交通拥挤也已经造成了相当严重的后果^[1]。以北京市为例,19%年全市总共发生拥挤堵塞16798起,市区路口拥堵严重、路段从1994年的36处,猛增到99处^[2];市区高峰期每小时机动车流量超过1万辆的路口已达27个,主要道路平均负荷度高达95%以上;机动车车速下降到12km/h,个别路段时速仅为7 km/h^[3];低速行驶带来了环境的恶化,据统计:北京市来自汽车排放尾气中的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化合物(NO_x)分别占北京大气污染物的63%、73%和50%,是北京大气中的主要污染源^[4]。

在长期的实践中,人们认识到,通过修建更多的路桥以提高路网的通行能力的方式来缓解交通拥挤,无法满足日益增长的交通压力。另外,修建路桥的巨额资金和城市空间的严格限制,也使这一方法的有效性大打折扣。因此,在现有道路条件下,提高交通控制和管理水平,合理使用现有的交通设施,充分发挥其能力,是解决交通问题的有效方法之一。

实施交通控制可以减少汽车的停车次数,并使车辆在较佳的状态下运行,从而减少尾气污染和能源消耗。城市道路交叉口信号控制虽然有改善交通流秩序与安全的优点,但是若不能提供控制优化,将会产生交通流停顿与拥堵的负面效果,会成为城市交通拥堵的一个重要原因。尤其是城市主干道在交通流高峰期,由于交通流在大部分交叉口遇到红灯停顿产生的拥堵会从小面积扩大到大面积,其负面影响对城市交通拥堵是极其严重的。现代城市交叉口信号控制理论研究证明,实现交叉口信号协调控制,使其在信号配时优化条件下,实现交通流在交叉口处遇到绿灯信号而不在交叉口处停车等待(即形成道路双向交通流的“绿波带”),将极大改善在高峰期的交通拥堵现象,是城市街道交通控制的最佳措施。其中相位差优化方法是协调控制效果好坏的关键技术。因此对相位差优化方法的研究至关重要。

1.2 研究现状

1.2.1 国外研究现状

道路交通自动控制技术的起源是交通自动信号灯的诞生。1868年，在伦敦的威斯明斯特(Westminster)街口，英国发明家奈特(J. P. Knight)设置了世界上最早的交通信号灯。信号灯由红绿两种颜色组成的臂板式煤气信号灯，用来控制交叉路口马车通行。1918年，美国纽约街头上出现电气照明的三色信号灯，通过人工操纵实现控制。1926年，英国人伍尔弗汉普顿(Wolverhampton)在前人研究的基础上，安设了第一座自动交通信号灯，摆脱了人工操纵的繁琐，但是这是一种定时周期的交通控制方式，在交通量变化比较大的地方不是很实用，同时要针对不同的时段的交通量设置不同的控制策略。直至1928年，美国巴尔的摩(Baltimore)试制成功了世界上第一台感应式信号机，这种感应式信号机所使用了由交通工程师阿德勒(Adler)发明的橡皮管作交通信息检测器。至此，人们开始以系统的观点，解决交叉路口“各自为政”孤立控制与交通流时空连续性之间的矛盾，把相邻的几个交叉口作为一个整体来考虑，对相邻交叉口进行协调控制。长期以来，人们对干道控制进行了不懈的研究，取得了一系列的成果。

(1) 在理论研究方面

1958年，Webster^[6]等人提出经典的延误模型以及停车数模型。

1988年，Cronje^[7]等人提出车流到达为马尔科夫过程的观点，推导建立了停车率计算模型。

1996年，Little J. D. C^[5]首先提出了最大绿波带宽的MAX—BAND控制，对有n个交叉路口的 S_1, \dots, S_n 的城市交通干线，给出一组有花的相位差，使尽可能多的机动车在设定的速度范围内能够一次不停地通过交通干线。

2002年，Gartner^[8]等在MAX—BAND方法的基础上提出了复合绿波带宽的MULTIBAND控制，对其许多重要特性都进行了改进，如增加排队车辆的清空时间、允许车辆左转等，以及实现干线中不同路线有不同绿波带宽。

2001、2002、2003年，Hakim、ADLER、FRANCE^[9]相继提出多种基于多智能体的道路交通分布式控制概念模型来对干线的双向绿波带研究。

国外的学者们在对建立双向绿波带的模型和对绿波带控制时也采用了不同的研究方法。

1983年，Akcelik^[10]等人，通过概率论方法研究得出了车辆到达和离去的规律服从某种概率分布，车辆到达累计数与离去累计数之差为排队车辆数，来建立干线绿波带模型的车辆的排队长度。

1998年，Newell^[11]等依据排队论将某种交通设施(如交叉口、瓶颈等)模拟为服务台，把交通流在路段上的运行过程看作车辆在排队系统中接受或等待服务，认为车辆在系统中等待服务即为排队，根据排队论建立干线上的绿波带模型的车辆排队长度。

2001年，Kim^[12]将遗传算法引入了城市路口信号的模糊控制，实现了模糊控制器参数

的实时性全局优化,有效地改善了模糊控制器性能。然而遗传算法控制参数的合理选取也是一项需要反复试验、相当繁琐的工作。

1980年, M. G. Singh^[11]运用大系统的观点和方法, 将大系统递阶控制的目标协调法应用于城市交通网络控制, 建立了网络模型及其求解算法。Saradis等在Singh提出的模型的基础上, 对算法行改进, 代表了交通控制一个新的发展方向。

1976年, J. S. Baras和W. Levine^[5]等人运用随机理论对城市交通网络进行了深入、细致研究, 取得一些新的结果。

国外的专家学者对于干道协调控制优化研究的工作, 主要基于绿波带宽度最大和基于延误最小两方面。早期, 学者们通过理论分析, 对定时式线控制系统采用时间—距离图进行交通信号协调控制的研究, 通过采用较为直观的图解法和数解法确定线控制的重要参数绿时差。这种人工工作图或计算方法不仅十分繁杂, 难免发生人为错误, 而且协调效果不一定是最好的, 更无法处理多相位等复杂配时方案的多个交叉口之间的协调。

目前主要集中在大系统递阶控制以及模糊控制等方法上。20世纪70年代, M·G·辛格等应用递阶大系统控制理论成功地在伦敦通向白金汉宫的一条由3个交叉口组成的干道上实现了递阶最优控制, 开创了应用大系统理论解决城市主干道交通控制问题的先例^[13]。一九八四年, 日本学者M. Nakatsuyama^[14]等将Pappis法^[15]加以推广, 提出两个理想交叉口的信号灯模糊干道控制方法, 但他和实际应用有较大差距。南韩学者Jee. HyongLee等^[16]于一九九五年出分散控制方法, 对交叉口群进行模糊控制, 有较好的应用前景。

(2) 在实际应用中

1917年, 世界上第一个线控系统出现在美国的盐湖城, 它是一种可同时控制6个交叉口的手动控制系统。1922年德克萨斯州休斯顿市发展了可控制12个交叉口的瞬时交通信号系统, 控制特点是采用电子自动计时器对各个交叉13的交通信号进行协调控制。1967年Purdy生成了一种简易的、适用于新建交叉口群的干道相位差计算方法, 其只需输入各个交叉口的间距、绿信比、公用周期时长和车辆的平均行驶时间^[17], 由该方法得到各个交叉口绿灯时间的中点时刻相差半个周期时长, 即各个交叉口的中点时刻符合交互式协调控制。1981年美国的J. D. C. Litter和W. D. Brooks等人利用最大绿波带相位差优化方法开发的MAXBAND最大绿波带交通信号设计优化程序^[18]。MAXBAND针对给定周期时长、绿信比、信号间距和连续通行车速的线控系统, 对其信号时差进行优化, 以获得系统的最宽通过带, J. D. C. Litter所建立的混合整数规划模型被MAXBAND选为用作优化算法; 把J. D. C. Litter的“不等宽优化模型”和W. D. Brooks的“互相影响法”结合起来, 作为PASSERII线控系统协调软件的优化算法, 它可以处理多相位配时。后面人们发现, 当道路交通量非常大的时候, 交通量接近饱和或者过饱和的时候, 这些以非拥堵情况下建立的这些模型而开发的干道协调控制软件在的道路交通拥堵的情况不适用, 所以, 交通工程师针对道路通过饱和情况, 研究了一些新的方法, 开发了一些的干道协调控制软件, 如Kowali提出的ASCS商业软件, TRANSYT-7F等, 这些软件就是针对交通量过饱和的情况下而开发的。

澳大利亚的SCATS系统、英国的TRANSYT和SCOOT系统、加拿大的RTOP系统都是20世纪80年代初为解决交通拥堵问题而研究产生的。目前在实践中取得较好应用效果的主要有SCOOT系统、TRANSYT系统和SCATS系统, 世界上很多城市都在很广泛的应用这些系统。

1.2.2 国内研究现状

我国对城市交通控制系统的研究起步较晚,20世纪70年代后期才对干道协调控制问题进行研究,多集中在基于延误最小的协调控制优化方法上。

(1) 在理论研究方面

根据大系统—分解协调原理提出的城市干道协调控制理论有:

北京工业大学的赵国永等人针对中关村西区单向交通干道的交通状况,根据大系统理论的分解协调思想,提出一种干道协调控制方案^[19],根据干道上各个交叉路口上传的有关交通信息,在决策转换开关的作用下,决策协调单元采取相应的控制策略:当干道的交通流量较大时,实施绿波控制;反之,实施分散协调控制。控制策略比定时控制具有明显的优势,可显著地降低排队长度及车辆延误,提高通行车辆速度,并能够实现绿波控制,可达到最终提高干道通行效率之目的。

基于模糊控制的城市干道协调控制理论有:

中国人民公安大学的吕兵等人针对当交通量变化频繁而剧烈时,传统控制模型具有一定的滞后性,提出了类排队长度的概念,通过它来反映交叉口的排队程度和交通状态,同时考虑交通干道上下相邻交叉口流入本交叉口的交通量,动态反映出下一时刻交叉口的交通输入量,综合车辆在道路上的行驶时间和由此引发的延迟,以此制定模糊控制规则,完成交通干道的控制的建模工作。并对这种模糊控制方法^[20]进行了计算机仿真,结果表明,能够较好地解决干线模糊协调控制问题。

基于大系统分解—协调原理与模糊控制相结合的城市干道协调控制理论有:

东南大学的陈森发等人根据大系统分解—协调原理,提出一种新的城市交通信号灯模糊线控制方法^[21]和系统的两级递阶结构:控制级和协调级。控制级的任务是负责输出各个交叉口信号灯的周期和绿灯时间;而协调级则是根据受控道路的主次干道车流量的状况,对系统进行协调。由于不需要统一周期的时间,而是由交叉口之间协调,所以可以减少车辆的平均延误。

此外,还有刘智勇等人提出用递阶结构和模糊理论来解决交通干道的实时协调控制问题^[22],把干道上的各交叉路口作为子系统,通过检测器检测各交叉路口交通量数据,通过光纤,上传到协调器,然后以已经编制的模糊控制准则,确定干道上的各个交叉口的相位差和干道公共信号周期,使得整个区域的总延误最小。并用在交通仿真软件证明了该方法能够有效性,使得排队长度变小,减少了延误,达到了相应的控制目标,结果比较理想。

基于流量预测模式的城市干道协调控制理论有:

同济大学的常云涛等人探讨了传统解法城市干道协调控制中存在的典型问题,通过分析各个交叉口的“驶离—到达”模式^[23],采用智能算法遗传算法求解,提出了一种新的城市干道协调控制相位差优化设计方法,为大家提供了一种新的研究思路和方法。并通过实例证明了该方法的优越性,与现实情况更加吻合,具有较强的现实意义,达到了理想的控制效果。

(2) 在实际应用中

我国在干线控制方面的研究起步比较晚,国内的线控系统大多数是引进了外国的线控

方法和技术。此外与发达国家比较,我国交通最大的一个特点是:机动车辆与非机动车辆以及行人在同一路面上混合在一起,交通流复杂。直到20世纪70年代国内才开始把电子信息和自动控制技术等应用在交通运输和交通管理领域中,最早开始进行交通信号控制研究和研发的是北京、上海以及广州等大型城市,然后在全国很多大城市推广使用线性协调交通信号控制系统和单点定周期交通信号控制器。

20世纪80年代以后,随着城市车辆的增多,道路车辆堵塞问题越发严重。国家在改善城市交通基础设施建设的同时,着力研发适应我国的城市中心交通控制系统,用以缓解城市道路交通的拥挤问题。另一方面我们还引进了国外一些先进的交通控制系统(如澳大利亚的SCATS系统、英国的SCOOT系统等),还有一些城市根据实际交通情况,建立交通控制系统,缓解道路交通压力。随着经济的快速发展,我国开始对包括优化道路交通管理、车辆动态识别、驾驶员考试系统、交通信息采集等智能交通系统基础性的工作进行研究开发;九十年代开始建设交通指挥控制中心,现在我国的大中城市基本都已建立了交通控制或指挥中心,同时开展了城市交通管理和驾驶员信息系统智能化诱导技术等方面的研究。虽然这些交通信号控制系统在一定程度上缓解了交通拥挤的情况,也提高城市道路运行效率,但是我国受到机动车、非机动车混行等客观因素影响其技术能力相对比较落后,这使得从国外引进的一些先进的交通协调控制系统执行效率不高,大多数还在采用最基本的单点控制模式,只有在少数的城市和道路上实现协调控制的作用^[24]。

1.2.3 存在问题

在研究和开发城市交通控制系统的工作上我国很多专家在理论上已经有了很大的突破,而且也取得了一定的成果。研究开发交通控制系统中已经取得良好效果的是对孤立的信号交叉口进行控制,但是对探讨研究干线控制系统和区域控制系统没有取得理想效果。

城市交通路网中任何的一个节点包括城市中的信号交叉口,每一个交叉路口的工作状态在受到相邻节点状况的影响下同时也影响着相邻节点的工作状态。对于城市道路上的交叉口,如果不能根据实际交通情况,进行优化协调控制,有可能会造成整个城市交通的严重拥堵,无法实现信号控制改善交通流与安全的优点。同时对城市中的交通流产生负面效应,造成堵车现象发生。特别是对于城市交通干线而言,车辆在到达交叉口会遇到红灯停车产生堵塞,这样可能引起大面积的拥堵,从而严重影响了整个城市的交通状况。所以对孤立的交叉口进行控制利于提高整个交通路网的通行能力,但是不一定能达到理想的效果。因此,解决城市交通问题最有效的办法是实现对城市交通干线控制与区域控制。所以,对城市干线交通控制和区域交通控制的深入研究具有非常重要的意义。

1.3 本文的主要研究内容

论文研究的主要内容如下:

(1) 依据交通干线协调控制的基本原理和基本数学依据推导建立绿波带控制的数学模型,给出了干线交通双向平均延时、排队长度和停车率等模型,为绿波带控制的优化研

究提供模型基础。

(2) 建立了绿波带控制的控制优化多目标函数,采用粒子群算法对优化目标函数进行优化推导,给出粒子群优化算法的流程。

(3) 结合城市主干道的平面道路结构,对交通信息检测器布设提出设置优化方法;同时对未设置交通信息检测器的交叉口交通信息获取方法进行研究。

(4) 结合城市主干道上实时获取的交通流信息,对绿波带时差反馈控制进行了研究。本文的具体章节安排如下:

第一章为绪论,阐述本文的研究背景意义、主要研究内容和本文的结构编排,分析国内外研究的现状及存在的问题。

第二章为城市交通信号控制的基本理论,对交通信号控制的基本概念及术语、交通的性能评价指标、交通信号协调控制的基本理论、交通信号控制的分类进行了介绍。本章首先介绍交通流的基本概念,比如相位、周期和停车次数等。其次介绍用于评判交叉路口交通控制的性能评价的几种指标,其中包括交叉路口通行能力、饱和度、延误、停车率以及排队长度等。然后通过分类进行,介绍交通信号协调控制的基本知识。

第三章的研究内容为绿波带控制原理,为下文提供理论基础。城市主干道绿波带控制作为一种特殊的干线协调控制方式,首先从城市交通干线系统入手,通过描述城市交通干线系统的运行特点,对干线系统协调控制的方式、控制目标进行了归纳总结,并且对目前应用较广泛的几款主流协调控制系统进行比较分析。然后对绿波带控制的基本原理进行介绍,包括绿波带的概念、绿波带的类型以及绿波带控制的约束条件三部分。最后从绿波带设计的空间要求、绿波带配时设计方法、绿波带控制中的辅助信号设计和绿波带信号控制方案的切换四个方面对绿波带的设计方案进行了阐述。

第四章主要对绿波带控制进行优化研究。依据交通控制的基本原理和基本数学依据推导建立绿波带控制的数学模型,给出了干线交通双向平均延时、排队长度和停车率等模型,建立了绿波带控制的控制优化多目标函数,采用粒子群优化算法对优化目标函数进行优化推导,并给出粒子群优化算法的流程,并结合南京市白下路绿波带控制进行实例验证。

第五章将对交通信息采集技术和绿波带时差的反馈控制进行研究。首先结合城市主干道的平面道路结构,对交通信息检测器布设影响因素进行分析并提出设置优化方法。其次对未设置交通信息检测器的交叉口交通信息获取方法进行研究,并提出相关研究方法。最后结合城市主干道上实时获取的交通流信息,对绿波带时差的反馈控制进行了研究。

第六章结合南京市白下路沿线两个相邻路口的实例绿波控制优化方案的各项评价指标进行了分析,进一步验证了算法的有效性和可行性。

第七章为全文总结,并对未来进一步的研究方向进行展望。

2 城市交通信号控制基本理论

2.1 城市交通信号控制的基本概念和控制参数

2.1.1 基本概念

(1) 交通流量

单位时间通过道路或某一车道指定地点或断面的车辆数，如小时交通量、十五分钟交通量等。

交通流量是一个随机数，在不同的时间、不同的地点，交通流量是动态变化的。

(2) 饱和流量

在一次连续的绿灯信号时间内，进口道上一列连续车队能通过进口道停车线的最大流量。交叉口进口道饱和流量是衡量交叉口放行能力的重要指标。

(3) 饱和度

是指某一相位时间内，实际进入交叉口进口道*j*的交通流量 q_{ij} ，与该进口道的饱和流量 S_i 的比值。计算公式为：

$$x_i = \frac{q_{ij}}{S_i} \quad (2-1)$$

饱和度是交叉口信号控制的重要技术参数，是衡量路口阻塞程度的一个重要度量。

(4) 通行能力

通行能力指在一定的道路交通条件下，某一路段单位时间内通过断面的最大车辆数，它表征了道路交通设施处理交通的能力。计算公式：

$$N = \frac{S \cdot g_e}{C} \quad (2-2)$$

其中*N*为进口道的通行能力，*C*为周期时长， g_e 为有效绿灯时间，*S*为饱和流量。各进口道的通行能力之和为整个交叉口的通行能力。

(5) 相位

在信号控制交叉口，在周期时间内按需求人为设定的，同时取得通行权的一个或几个交通流的序列组称为相位。对于一个交叉路口，根据实际情况可以设计为两相位、三相位或者更多相位。

图2-1为典型两相位信号交叉口，南北向为第一相位，南北向道路放绿灯，东西向道路放红灯；东西向为第二相位，东西向道路放绿灯，南北向道路放绿灯。

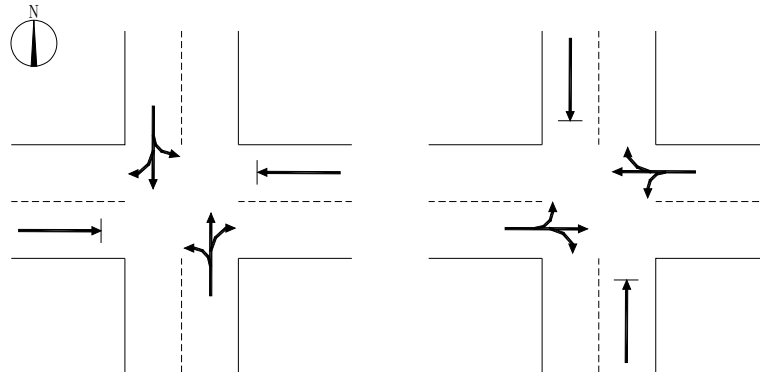


图 2-1 四路交叉口两相位基本控制方案

2.1.2 控制与评价参数

(1) 周期

周期是指某主要相位的红灯启亮始到下次红灯再次启亮的一段时间；也可定义为信号灯各种灯色显示时间之总和，即各种灯色轮流显示一次所需的时间。

在基本的信号配时中，周期时长与许多因素直接相关：如车辆延误、饱和度、交叉口通行能力等。周期是交通信号关键控制参数，它的确定对交叉口的控制效果起决定性的效果。信号周期一旦发生改变，会引起许多因素发生变化：因此，配时设计时通常应当首先确定周期时长，进而再确定其它各参数。信号周期长度一般不小于36秒，一般不超过150秒，否则在交叉口处的车辆延误急剧增加。见图2-2所示。

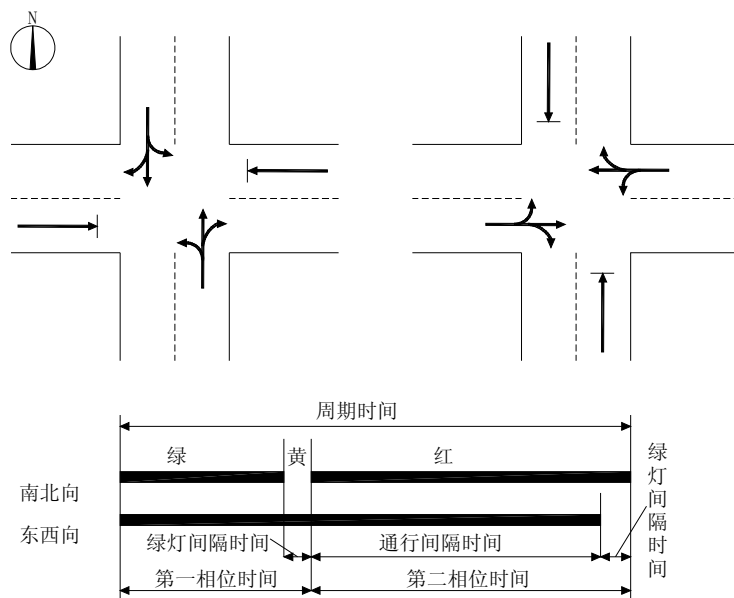


图 2-2 两相位信号配时图

(2) 绿信比

绿信比是一个相位的有效绿灯时间除以周期时长来得到的，用 λ 表示计算公式：

$$\lambda = \frac{g_e}{C} \quad (2-3)$$

式中：C为周期长， g_e 为有效绿灯时间。

有效绿灯时间是指在一个相位中，车辆能够最大利用通行的绿灯时间。最小有效绿灯时间一般不小于5s。

合理的绿信比，能够提高交叉口时空利用率，增加交叉口的通行效率，增加通过交叉口的交通流量，减少延误。所以绿信比的大小对于疏通交通流和减少车辆在交叉口的延误有举足轻重的作用。

(3) 相位差

相位差分为绝对相位差和相对相位差。它是指在两个相邻的信号交叉口中，并且它们的周期相同，两个交叉口相同相位绿灯(或红灯)开始时间之差。又叫绿灯起步时距或绿时差。相位差是城市主干道群信号协调控制的一个重要控制变量，协调控制配时参数优化的设计主要基于交叉口之间的相位差。

绝对相位差是指各个信号的绿灯或红灯的起点或终点相对于某个标准信号绿灯或红灯的起点或终点的时间之差。相对相位差是指相邻两信号的绿灯或红灯的起点或终点之间的时间之差，相对时差则为道路沿线两个交叉口信号绝对时差之差。如下图2-3所示，A表示绝对时差，B表示相对时差。

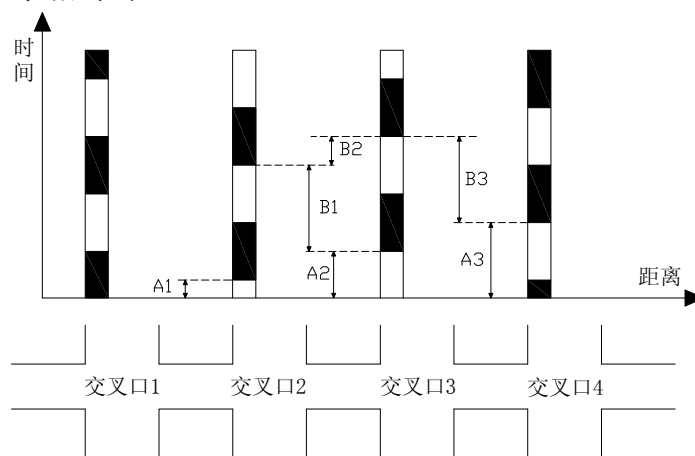


图 2-3 交叉口相位差示意图

无论以红灯终点为标准的时差，还是以绿灯终点为标准的时差，它们都是相等的。但是在实际应用中又有区别：一般多用面控制系统中确定信号时差采用绿灯起点或红灯起点为标准的时差。一般多用于线控制的通过带方法确定信号时差则采用绿灯终点或红灯终点为标准的时差。

相位差是系统联动控制中一个重要参数，当对一条交通干线上的交通流或一个网络内的交通流进行控制时，可通过调节各个路口的相位差，可以使一串路口的信号灯形成绿波带，在理想状态下，车辆通过这些交叉口时畅通无阻。

2.2 城市交通信号控制的评价指标

交通信号控制主要目标是使各种类型的交通流有秩序、高效率地通过交叉口。信号控制交叉口的信号配时，就是要在一定的交通条件下和一定的道路条件下，确定适当的周期时长，以致车辆有序、安全、高效的离开交叉口。

为了实现既定的控制目标，必须定义直接测量或间接测量的交通参数。当这些参数用于感应控制时，必须在线采集；当这些参数用于控制策略的评价时，可以离线获取。大多数交通参数不能直接测得。这些参数可通过对检测数据进行相应处理获得，与直接检测到的数据同时应用于控制算法中。控制策略的评价参数也可以通过仿真手段获得。

(1) 延误时间

延误是指交通冲突或信号控制设施的限制给车辆所带来的时间损失。交叉口进口道所有车辆的延误总计成为总延误，交叉口进口道每辆车的平均延误成为平均延误。延误是计算信号配时和衡量路口通行效果的一个重要参数，也常作为确定信号控制系统性能的重要参量。

人们尽管付出了相当大的努力，但仍不能普遍采用直接的在线检测方法。目前常用的间接检测方法：假定车辆的行驶速度，记录车辆的到达时间和驶离时间。驶离车辆的检测可以通过检测器自动完成。延误也可以通过浮动车的方法进行测量。

(2) 停车次数

停车次数就是一个信号周期内完全停车次数的总和。停车率是指一个信号周期内停车车辆数占通过停车线(交叉口)车辆总数的比率。

目前在线直接检测停车次数还无法实现，因此必须离线获得停车次数，常用的方法有：观测员手工记录方法、高空摄像方法、浮动车方法基于精确检测的流入—流出测量方法(仅在车辆至少停车一次的前提下才能得出结论)，而目前“多次停车”的准确检测需要进一步的研究。

(3) 通行能力

通行能力是指在实际的道路条件、交通条件和控制条件下，在一定时间内通过进口道停车线的最大流率。一定时间内，通常是高峰15min的时车流的流率。此外，通行能力的定义还假定要具有良好的气候条件和路面条件。

(4) 平均排队长度

平均排队长度是指在一个信号周期内各条车道排队最长的长度平均值。各条车道最长排队长度一般是指该车道的绿灯相位起始时的长度。

平均排队长度则以周期为单位计算，某个周期平均车辆排队长度与此周期平均车辆延误的指标基本是一致的。

(5) 行程车速

基于行程车速的交通控制能够形成局部稳定的车速。行程车速可通过设置在最大排队长度之外的交通信息检测器组在线直接测得。

2.3 城市交通信号控制的基本类型

交通干线或单个交叉口的交通规划方案是选择对其进行控制的合适方法的条件。此时必须考虑交通量、道路及交叉口建设状态以及现有控制设备的情况。交通控制的实施原则总是介于交通引导和交通适应两者之间。

当在某个特定的城市主干道上交通流有稳定的通行需求时,可优先选择采用交通引导的控制原则。这里的前提条件是交通量的变化是比较缓慢的,因为在这种控制原则下,不宜对短暂的交通需求变化做出反应。就控制系统设备,如检测器和控制器来说,实施交通引导原则进行控制,其代价相对来说是较低的。

如果需要对交通流量或者流向的短暂变化做出快速反应,使得控制具有更大的弹性,则可优先采用交通适应的原则。交通适应的控制原则要求有强大的检测和能得出交通流情况的数据处理系统,在此基础上形成灵活的控制方案或动态改变信号控制方案来实现控制目标。此方法要求有大量的交通信息检测点。信息的检测间隔很短(一般是一秒钟间隔)。

交通引导和交通适应的控制原则通常相互结合。信号控制系统和相关设备的布局应由交通工程的要求得出。

从不同的角度出发,可以将交通信号控制分为不同类别:按照控制范围分类,可分为单点控制、干线线控制和面控方式;按照控制策略分类,可分为分散控制集中控制和递阶控制;按照控制结构分类,又可分为定时式脱机操作控制和感应式联机操作控制。

2.3.1 按控制范围分类

(1) 单点控制

单点控制是指,对某个交叉路口的信号控制不考虑其周围的交叉路口信号控制情况,而只考虑该交叉路口本身而设置的控制方式。一般情况下,单点控制通常适用于相邻信号灯间距较远,同时线控和面控实施效果微弱的交叉路口。单个交叉路口可以采用定时控制,也可以用感应控制。目前,我国城市中的大多数交叉路口采用的控制都属于单点控制。

(2) 干线控制

干线控制是指考虑到交通干线上连续的交叉路口信号灯的相互影响关系,而采取协调控制方式。其目的是降低车辆通过这些交叉路口时遇到的红灯次数,进而减少车辆的停车次数,减少车辆通过干线的延误时间,最终提高城市主干道的通行能力。

干线控制是通过可以对协调控制几个信号灯设定共用的周期时长,同时以交叉路口之间的距离为依据,确定各信号灯对于干线主道上绿灯信号开启的时间时间差,即相位差。这样,车辆通过第一个路口后,以一定的速度行驶到第二个路口的时候,遇到的也是绿灯,依次继续下去,车辆有如运行在没有红灯控制的状态下,减少了车辆应停车与启动的次数和延误时间,提高车辆行驶速度,进而提高道路通行能力,保证城市主干道的交通高效畅通。相对于单点控制,干线控制的最大优势就是使得干线上的车辆沿着绿波带,以脉冲的形式无阻地通过连续的交叉路口,达到减少车辆通过这些交叉路口时遇到的红灯次数的目标。根据相邻交叉路口间的信号灯连接方式的差异,干线控制又可分为有线电视缆线控和无

线电缆线控。

交叉路口采用点控还是线控目前还没有固定的标准。一般来说,可根据如下情况进行综合判断:1)相邻交叉路口间距越小,线控的必要性越大;2)交通量(干线主干道方向)越多,线控的必要性越大。

(3) 面控方式

面控方式又称为区域控制,它是指对城市或城市的一个区域上的所有信号灯采用综合性协调控制。该控制方法以车辆通过控制区域而产生的总损失,即总的停车次数、总延误、总的油耗等作为面控的衡量指标,通过对区域所有的信号灯进行协调配置,而尽量减少车辆通过控制区域的总损失,提高交通控制区域的通行能力。

面控方式可分为无中心计算机控制方式和电缆协调控制。中心计算机控制是指中心计算机直接通过数据通讯系统调控交通信号控制器。无电缆协调是指各个交通信号控制器之间不采用信号控制线相连进行的协调控制,而是采用共同的时基同步来实现协调控制。

2.3.2 按控制策略分类

(1) 定时式脱机操作控制

定时式脱机操作控制是根据交通流历史及当前统计数据脱机得出分时段的最优信号配时方案。通过该配时方案存入控制器或控制计算机内,从而对整个区域交通实施多时段定时控制。此种控制方式优点是控制简单、可靠且投资小,缺点是不能根据交通流的变化情况而实时调整方案。

(2) 感应式联机操作控制

感应式联机操作控制是一种能够根据交通流实时变化而不断自适应调整的控制方式,也称为动态响应控制系统。通过在控制区域的交通网中设置检测器来实时采集交通数据并实施联机最优控制。自适应控制系统投资高、结构复杂,对设备可靠性要求高,相对于定时式脱机操作控制,感应式联机操作控制最大的优点是能更好地适应交通流的随机变化,适用于交通流变化较大的交通网络。

2.3.3 按控制结构分类

(1) 分散控制

分散控制是指控制系统由若干个相对独立分散的控制机构组成,每个分散控制机构只能获得控制系统的部分信息,同时根据局部环境对大系统作局部控制。

分散控制的优点:1)设备的费用低,维护方便;2)可靠性好;3)局部控制好。但是由于所获得的信息局部性,其缺点体现在整体协调性差。

(2) 集中控制

集中控制是指对控制过程及控制对象的检测都是由中心控制机构来完成,检测信息集中传递给中心机构,中心机构根据全局状况以系统的评价指标作为参考依据来发出控制命令。

集中控制的优点:1)整体协调控制好;2)管理调控方便;缺点:1)随着系统规模的扩大,

集中控制的可靠性降低；2) 计算控制命令的时间上。

(3) 递阶控制

递阶控制是指由分散控制机构加上一个协调机构组成,通过协调各个分散控制机构的工作而形成递阶控制。在该结构中,第1级是包含各个局部控制机构,它们根据局部环境做出局部控制。第2级是对第1级控制机构进行协调的机构,它们根据全局环境完成全局性的控制任务。随着问题规模的扩大,控制系统还可以扩展更多控制级。因此,递阶控制也称为多级控制。由于系统的组织结构,阶梯控制兼有分散控制与集中控制的共同优点,可以灵活进行地进行交通数据采集与交通控制决策工作。

2.4 小结

本章内容为城市交通信号控制的基本理论,对交通信号控制的基本概念及术语、交通的性能评价指标、交通信号协调控制的基本理论、交通信号控制的分类进行了介绍。本章首先介绍交通流的基本概念,比如相位、周期和停车次数等。其次介绍用于评判交叉路口交通控制的性能评价的几种指标,其中包括交叉路口通行能力、饱和度、延误、停车率以及排队长度等。然后通过分类进行,介绍交通信号协调控制的基本知识。

3 城市主干道绿波带控制原理

3.1 城市交通干线协调控制分析

3.1.1 城市交通干线系统的基本描述

在城市路网中,交叉口相距很近,两相邻交叉口间的距离通常不足以使车队完全疏散。对各交叉口分别进行单点信号控制时,车队会经常遇到红灯。为了减小车队在各交叉口的停车次数,特别是当干线上的车队比较通畅时,人们研究了一种干线相邻交叉口协调控制策略。即干线各交叉口执行相同的信号控制周期,协调相位的绿灯开启时间错开一定时间。当车队进入干线系统时,干线协调控制使车队在通过交叉口时总在绿灯开始时到达,因而无需停车通过交叉口,如图3-1所示。这样能提高车队行驶速度和道路通行能力,确保道路通畅,减小车队在行驶过程中的延误。

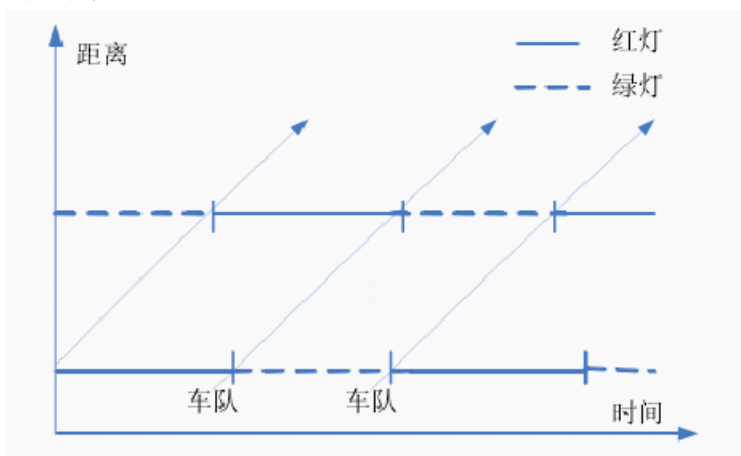


图 3-1 城市干线交通协调控制示意图

在干线协调控制系统中,为了使得各交叉口的交通信号取得协调,各交叉口的周期时长必须是统一的。干线中各交叉口的绿信比是根据各个交叉口的流量来确定的,因此,各个交叉口的绿信比可以不一样。为了使得车辆通过干线系统时,能够尽可能地少遇红灯,必须使相邻交叉口的相位差与车队在其间的行驶时间相适应,相位差是实现干线协调控制的关键参数。

3.1.2 城市交通干线系统协调控制的方式

复数交叉口的控制有如下几种:

联动控制	简单联动控制
	多级联动控制
	自动感应联动控制
区域控制	

联动控制是在一条道路的总长范围内对一系列信号设置共同周期时间和时差来进行

控制的方式，对于单独交叉口的个别控制也叫线控制。如图3-2所示，给出通过带联动控制的一个示例，图中给出了时间与距离的关系。通过带的斜率表示速度。联动控制中的简单联动控制是按预先规定的一种控制图式（一组周期时间、分相、时差）进行一天的控制。这种控制可以通过主控制机将指令送给末端控制机进行控制。如果一天的交通量大体不变时，就是这样的控制也能得到充分的效果，然而实际的交通量在一天当中会反复有多次大的时间变动。从单独的交叉口情况来看，交通量一增加，为了让交叉口的通行能力增加，就需要将周期变大；如果交通量减少时，相反的需要将周期时间缩短，以谋求减少延误时间。而且交通量一旦增加，速度就降低，所以最好让时差与此配合。由于这样原因，为了进行与交通状况相适应的高效率的联动控制，需事先准备几种控制图形，按程序对每个时间带变换图形，这种控制叫做多级联动控制。

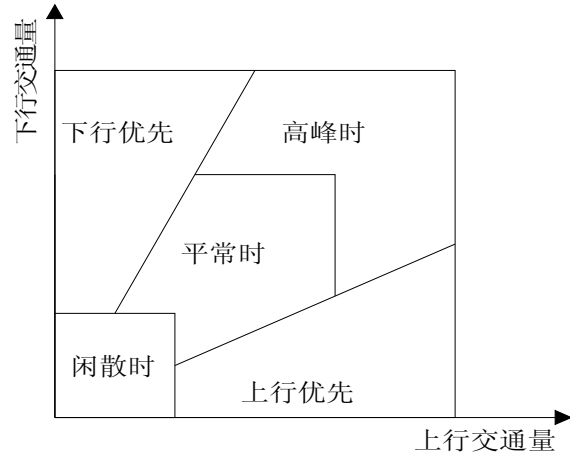


图 3-2 控制图形的转换

自动感应联动控制是将交通状况分成几个图形类型，事先准备好与各自交通状况对应的控制图形，测定代表性地点的交通流，选择其最接近于交通状况的控制图形，以便进行控制。这种控制方式需要为了测定交通流用的交通信息检测器、传输数据的线路，还需要为了处理数据和选择控制图形用的计算机以及指令用线路等。在实际应用中，控制方式的选择需要综合考虑控制效果和投资受益来加以研究。

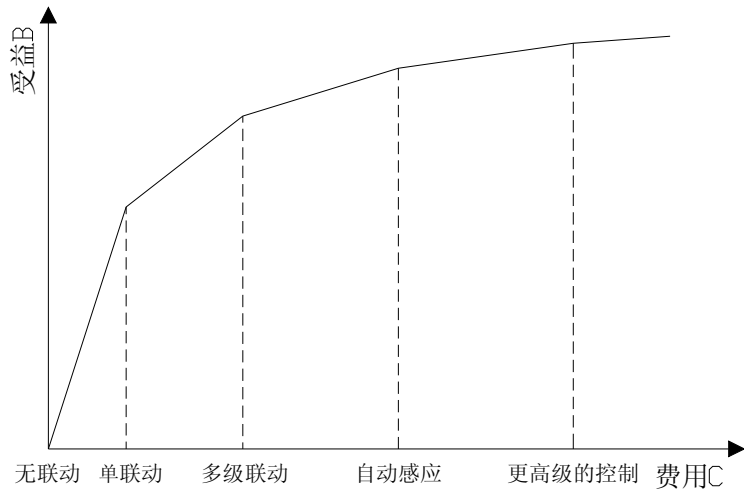


图 3-3 投资效果概念图

3.1.3 城市交通干线系统的协调控制目标

作为交通干线信号参数最优化的评价标准，可考虑：通过带宽度、延迟时间、停车次数、旅行时间、通行能力、多余度、噪声废气和耗油量、交通事故等。

(1) 通过带宽度，过去是当做联动控制理论的中心而被采用的，现在也作为实用标准而被采用。然而在本质上这是为了研究时间与距离关系图的几何考察的标准。其缺点是由此所得的时差未必能保证最短延迟和最小停车次数，而且为区域控制应用时带来一些困难。

(2) 延迟时间是代替通过带而在最近的研究中被广泛采用的标准。一般认为驾驶员最希望的是最短延迟，此外，因为由此能够计算信号控制的时间收益等，其实际意义很大，因而作为评价标准是很好的。

(3) 停车次数与耗油量等行驶费用有关。所以如果取延迟时间和停车次数的加权之和，就能够用货币表示货币控制的效果。但可以认为在停车次数与延迟时间之间有一定程度的相关关系。

(4) 旅行时间，若考虑设计速度（联动速度）为已知数，其结果是和延迟时间相同

(5) 通行能力，如果除了交叉口间隔短的情况之外，与其说是时差，还不如说是考虑周期时间或分相最优化的标准也许是恰当的。

(6) 对噪声、废气和耗油量等与时差的直接关系不明确，所以取为最优化的标准在现阶段还有困难。但是一般认为这个标准与(2) — (4)的标准具有一定程度的相关关系，如果通过这些标准有可能用函数表示的话，那么间接地按6的标准求最佳参数是可能的。

(7) 对于交通事故，也有按照联动化来减少尾撞事故的例子，但直接把这个因素当做标准差来控制是困难的

3.1.4 城市交通干线系统协调控制系统

(1) TRANSYT系统

TRANSYT(Traffic Network Study Tools)系统是由英国道路研究所研制成功，目前有TRANSYT-11和TRANSYT-7F9.6 两个版本。

TRANSYT系统采用静态控制模式，以平均延误时间、停车次数、排队长度为交通评价指标，通过已有的系统控制策略来计算出交通控制的重要参数，如相位差、信号周期。TRANSYT已经部署在很多不同城市，取得了不错的社会经济效益。但是，由于TRANSYT的数据静态采集性，在实际应用中存在许多不足：1) 计算量大；2) 对于交通流量的变化反应过慢；3) 对城市交通网络的改变及扩展实用性差，需要重新制定新的交通控制方案。

其基本原理如图3-4所示：

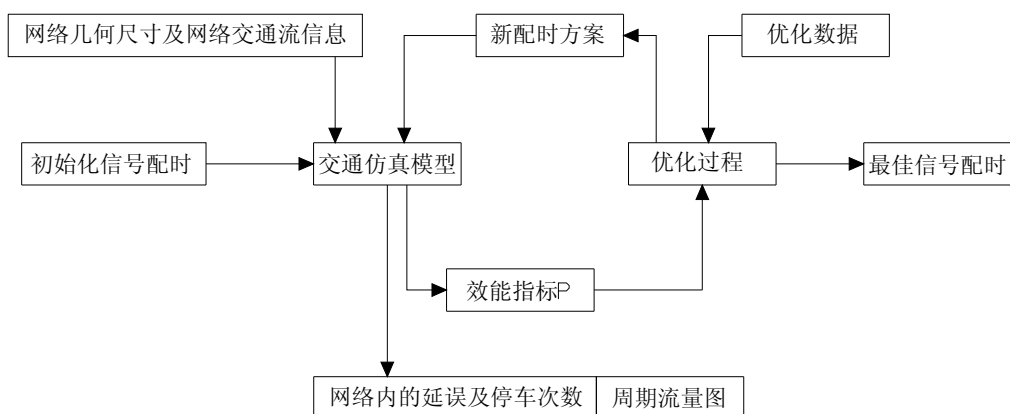


图 3-4 TRANSUT 基本原理图

(2) SCOOT系统

SCOOT(Split Cycle and Offset Optimization Technique)系统，是英国运输和道路研究所与3家公司在TRANSYT的基础上开发出的一种具有实时协调性与自适应性的交通网络控制系统。SCOOT的优化原理与TRANSYT相仿，最主要不同点在于具有实时性。SCOOT系统通过检测器采集车流量信息，并联机对信息进行处理来生成交通控制参数设置方案。SCOOT采用“小步长渐近寻优”方法来减少计算量。相对于TRANSYT，SCOOT采用了实时控制，调控方便灵活，因此获得优于静态系统的控制效果。它的不足之处在于：1) 局部检测器的实效可能导致系统优化的失败；2) 信号灯相位及相位顺序不能自动改变。

(3) RHOSDE系统

RHOSDE(Real-time Hierarchical Optimized Distributed and Effective System)系统通过预测单个车辆的到达和车队的运动，分别跟踪交通流在较短时间内的波动和较长时间内的变换趋势，根据最优化给定的性能指标，如最小平均延误、最小路口平均排队长度或最小停车次数等来划分相位，提出了非参数化控制模型，即不是利用周期、相位差和绿信比等参数制定信号配时方案，而是采用相序和相位长度来制定信号配时方案。实验证明RHOSDE系统对半拥挤的交通网络有很好的控制效果。

(4) MOT系统

MOT(Multialgorithmic Optimization Tecchnique)系统，即多路运算优化技术，一种适应式联机操作控制系统。MOT系统采用分层式结构，由中心控制主机、区域控制器、路口设备三级构成，因此具有较好的可靠性和安全性。在系统通讯正常时它执行的是中心控制方式；当控制中心和区域控制器的通讯中断时，与该区域控制器连接的路口机可按储存的交通方案进行子区协调控制；当路口机和区域控制器的通讯中断时，路口机根据已存储的配时方案进行单点控制。

(5) SCATS系统

SCATS(Sydney Coordinated Adaptive Traffie system)悉尼协调自适应交通系统，是由澳大利亚新南威尔士道路和交通局(RTA)于上世纪70年代末研制成功的，从1980年起陆续在悉尼等城市安装使用。目前世界上有很多城市正在运行SCATS系统，在我国SCATS系统已在上海、天津、宁波、杭州等几个城市投入运行，并且取得了一定的实施经验。

SCATS系统包括中央监控系统、区域控制中心和图形界面(GUI)工作站。一个中央控制

系统最多可连64个区域控制分中心，每个区域控制中心可控制250个信号交叉口，理论控制规模为16000个交叉口。

SCATS系统是一种3级结构：最上级为控制中心，完成管理系统的任务；中间级为区域控制机，完成“战略”控制任务；最下级为交通信号控制器，分担战术控制任务。当路口数较少时，可由区域控制机与交通信号控制器组成两级结构的最小系统。在SCATS系统中，区域控制机所负责的信号协调控制区域被分成一个个子区，每个子区由1-10个信号交叉口组成，这些交叉口具有公共周期长度。系统根据子区的类饱和度，以最长可达6s的步长将公共周期长度加以更新。类饱和度是用安装在停车线附近的交通信息检测器来测量。子区的每一个交叉口都有4种绿信比方案。在每一个方案中，还包括若干“车辆感应”交叉口控制策略，它们包括相位的急速变化，备用时间的转让，相位划分和规定等。

3.2 绿波带控制基本原理

3.2.1 绿波概念

“绿波带”是交通控制中“信号灯多点控制技术”的一种形象化说法，即在一个交通区域或一条交通干线上实行统一的信号灯控制，将纳入控制范围的信号灯全部归入计算机控制系统，并使用先进的计算方法，根据车流量来科学合理地指挥交通。从被控制的主干线各交叉口的灯色来看，绿灯就像波浪一样滚滚向前，故被形象地称为“绿波带”。双向绿波带协调控制实际上就是把主路上所有交叉口的交通信号进行协调配时，使得进入主路的双向车队按某一设计车速行驶时一路绿灯，大大减少停车率，从而实现道路交通分布均衡、稳定和畅通，并明显改善住路的交通状况。

在城市道路网中，交叉口相距比较近，相邻的交叉口之间的距离通常不足以使车流完全疏散。当各交叉口分别设置单点信号控制时，车辆经常遇到红灯，时停时开，行车不畅，环境污染比较严重。为了减少车辆在各个交叉口的停车次数，特别是当干线上的车辆比较畅通时，人们研究了一种干线相邻交叉口协调控制策略。协调信号计时的方法是基于绿波的概念，相邻交叉口执行相同的信号控制周期，干线相位的绿灯开启时间(相位差)错开一定的时间，交叉口的次道在一定程度上服从主干线上的交通。当一列车队在具有许多交叉口的一条主干线上行驶时，协调控制使得车辆在通过干线交叉口时总是在绿灯开始时到达，因而无需停车通过交叉口，这样就大大提高车辆行驶速度和道路通行能力，确保道路畅通，减少车辆的延误时间。

为了便于实现干线交叉口信号的协调控制，对于干线上的所有交叉口，都采用共同的周期长度；而对于少数交叉口，也可采用不同的周期，但必须与共同周期成倍数关系，本文研究的干线交叉口是具有相同信号周期的。所谓干线交叉口的最佳共同周期 c 。就是在负荷最高的关键交叉口所需的最佳周期长度。随着社会和经济的发展，城市中的交通工具日益增多，城市各主干线的交通压力也随之增大。要缓解这一压力，提高交通流量，防止出现交通堵塞，目前常用的一种方法就是把主干线上一批相邻的交叉路口的交通信号连接起来，加以协调控制，使主干线车辆通过这些交叉口时尽可能的遇到绿灯，为主干线

直行方向的车队提供最大绿波带，减少干线上的延误和停车率，以保证干线上的车辆能够畅通，这种方法称为“绿波信号控制”。通常的研究都是考虑单方向的绿波控制，本文研究的是双向的绿波控制，也就是让车辆在干线上双向行驶时都尽量是以很小的延时和很少的停车次数通过各交叉口，形成绿波带。

在双向道路的绿波设计时，时距图中有一个关键的交点，这个焦点叫做绿波带中心线交点（TP），相向方向的绿波带中心线在这个点上相交。绿波带中心线交点与交叉口中心之间位置关系分为重合、靠近和远离三种关系(如图3-5、3-6、3-7)。

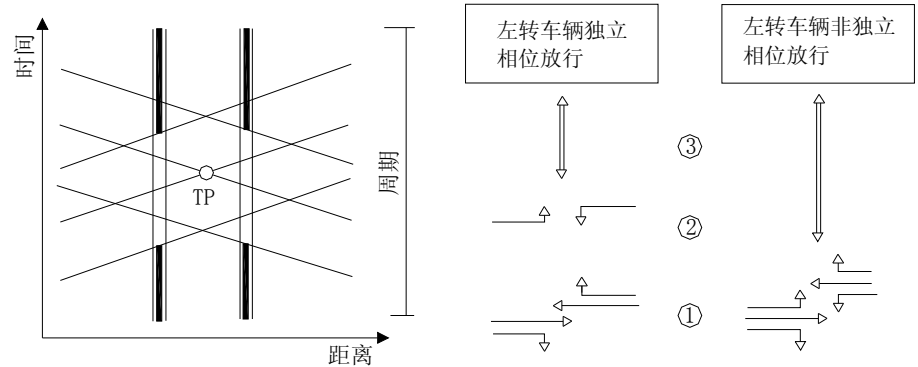


图 3-5 绿波带中心线交点与交叉口中心重合及其信号相位

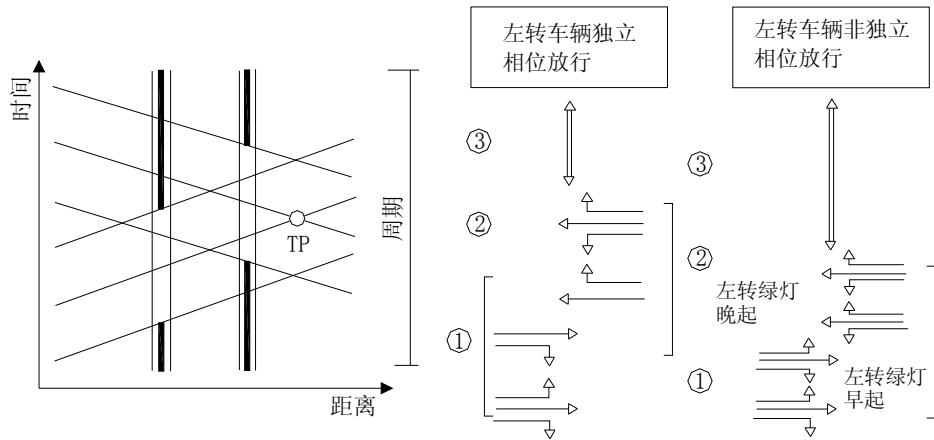


图 3-6 绿波带中心线交点靠近交叉口中心及其信号相位

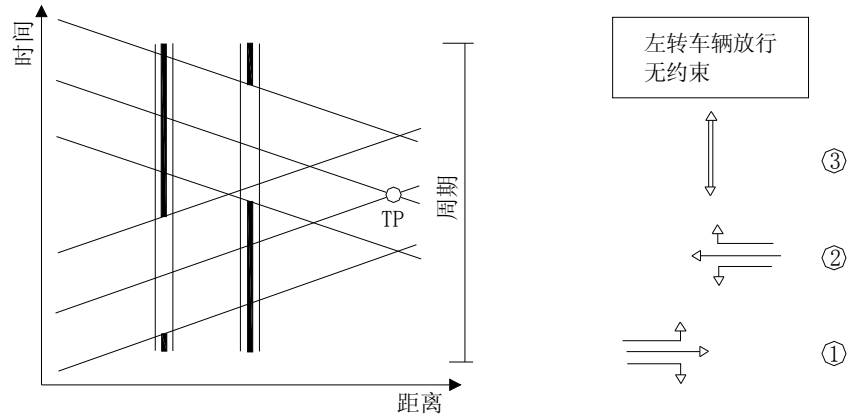


图 3-7 绿波带中心线交点远离交叉口中心及其信号相位

3.2.2 绿波的类型

根据绿波带控制系统车辆放行方式的不同，可分为渐进式系统和同步式系统。

(1) 渐进式系统

渐进式系统的设计方法是根据路段上各停车线到相邻停车线的行驶时间，设计连续交叉口的绿灯时间起亮时差正好等于路段上车辆各段累计的行驶时间。

在双向行驶的路段上，如果绿波带中心线交点的位置能够与相交道路流量大的交叉口位置相一致，则会达到理想的绿波控制效果。

然而，这两种距离并不总是相一致。所以不可避免地，只有减少设计的绿波宽度才能使交叉口上相交方向的车流满足要求。在绿灯时间不发生交叠的交叉口（图3-5），转弯车辆的通行不会受到阻碍。在绿灯时间发生交叠的交叉口（图3-6），绿波带包括一部分独立的早启和迟断左转绿灯时间。这样，可以利用主干道上的行人待行区，通过在两个独立的左转相位时间内设置行人相位，行人就能够安全地穿越主干道，由于共用信号，此时至多存在行人与相交道路右转弯车流之间的冲突。

在单向行驶的道路上（例如：在单向的环路上），设计绿波带非常容易，因此此时可以不考虑亮相叫绿波带中心线交点间距离的约束。

当采用基于交通流量的信号控制策略时，可以采用渐进式绿波系统。这时应满足以下设置原则：

(1) 不得采用绿灯时间迟断的动态调节方式，这样可以避免在下游交叉口处车辆遇到红灯。

(2) 如果本交叉口距下游交叉口距离很近，则不得采用绿灯时间迟起和持续绿灯相结合的动态调节方式（如图3-6和图3-7），这样可以尽量避免短连线上游交叉口绿灯时间的浪费。

(3) 不得采用绿灯时间早启的动态调节方式，以减少车队散布对绿波控制的不利影响。

(4) 在车队尾部通过交叉口之前，不得采用绿灯时间早断的动态调节方式，以避免因为突然的信号切换所造成的危险。

(2) 同步式系统

同步式系统绿波方案是在系统内所有交叉口同时起亮主干道绿波的系统。它适用于交叉口间距不大于100米的信号控制。连续几个距离很近的交叉口可以组成同步式系统再与另外的绿波系统进行协调。同步式系统允许主要道路上有转入交通流，因为这些转入的交通流产生的排队车辆在主干道方向车队通过之前已经开始通行。

3.2.3 绿波带控制的约束条件

目前在很多城市中，绿波带控制应用较少，交叉路口信号控制大多采用单点控制。城市道路中的交叉路口并不全部都能采用绿波带控制，根据实际的道路交通流情况选择不同的控制方式，有些交叉路口采用绿波带控制后反而会降低总的运行效率，增加交叉路口的车辆延误，可能引起堵车现象，在对相邻交叉路口进行信号协调控制之前，应该先考察干

线上这些交叉路口是否满足绿波带控制的条件。以下因素对绿波带控制的控制效率有很大的影响。

1. 车流到达特性

如果车辆均匀到达信号交叉口，降低了干线控制系统的要求，干线控制系统的总体效果就不是太理想，如果车辆脉冲式到达信号交叉口，车流形成车队，采用干线协调控制系统就可以获得良好的控制效果。造成车辆均匀到达的主要因素是：①从次要街道或者路段中间的出入口（例如商业中心停车场、库等）有大量的交通流涌入干线上两相邻交叉口；②有大量的转弯车辆从相交街道转入干线信号交叉口；③在信号交叉口之间形成车队的车流由于交叉路口之间的距离太远引起车队的车流消散。

2. 交通组织条件

由于单向交通运行有利于线控系统的实施及实施后的效果，因此对单向交通运行的干道应优先考虑采用线控系统。

3. 相邻交叉口间距

一般执行信号联动的交叉口之间的距离不要超过800m，因为干线系统中各个信号交叉口之间的距离越远，线控效果越差。

4. 信号相位设置条件

信号交叉路口的控制类型也对干线协调控制有很大的影响，由于信号配时方案与信号相位有关，信号相位越多，越不利于干线控制，影响干线协调控制系统的通过带宽越大。对于一些具有两个相位的简单交叉路口优先选用干线协调控制会产生良好的控制效果；一些具有多个左转相位的干线交叉口，选择干线协调控制效果不是很理想。

（5）交通量波动情况

每天各个时间段内的车流到达的特性以及交通流量的大小都会有很大的变化。根据每天交通量的变化情况选择不同的控制方式，在上下班时候的高峰期，干线各个交叉口的交通流很容易就形成车队，优先选择干线协调控制，而在非高峰期，由于各种原因不能形成车队，采用干线协调控制就不一定有良好的效果。干线系统在各个交叉口的控制方式应该根据该交叉口在不同时段的交通量决定。

3.3 绿波带设计方案

3.3.1 绿波带设计空间要求

在设计绿波方案之前，城市主干道的空间设计必须满足一些前提条件，否则可能对车流运行质量造成重大影响，进而影响绿波控制方案的效率。

（1）连续车道

绿波控制的路段，每个协调方向的连续车道应至少要有两条车道。这样，车辆才会有超车的机会，以减少绿波运行过程中慢行车辆对车队运行的影响。交通流运行的质量也会受到临时停车或路边停车的影响。在某些时段有效地限制路边停车，可能有助于减小这些影响。连续车道上的非港湾式公交车停靠站也会对交通流的运行造成影响。

（2）转弯车道

在交叉口内应给转弯车辆分配独立的转弯车道，这样直行车辆不会受到干扰，并且可以避免追尾碰撞事故的发生。左转车道在交叉口内部的没有排队空间，并且左转车流不能顺畅的情况下需要设置左转车道。如果不能设置专用的左转车道，则应全天或部分时间地禁止左转车流的通行，同时要给左转弯车辆提供可选择的出路。

（3）人行横道

不允许在绿波控制的路段上设置人行横道，部分路段可设置硬性隔离设施。

3.3.2 绿波带配时设计方法

绿波带配时的设计可以采用图解法和数解法。图解法可以最大限度地考虑到当地的特殊情况和管理者的设计目标，而数解法则更适用于处理复杂路网的配时计算。

3.3.2.1 图解法

绿波配时的首要前提条件是估计绿波行进速度，确定系统的关键交叉口及其周期时长，作为系统的共同周期时长，而后通过不断的调整各项配时参数得到绿波方案。图解法的基本思路是：首先，做出车辆的时间—距离图，简称“时—空”图，然后通过几何作图的方法，通过多次的引线，初步确定同步式协调或者交互式协调方式；然后再通过对周期长度反复调整，调整通过带速度，最后再确定相位差，最终获得一条比较理想的绿波，使得绿波宽度达到最大，提高绿波的通行效率。

其中时间—距离图的绘制遵循以下步骤：

- （1）根据绿波带中心线交点的位置和计算的周期时间，绘制绿波带的轴线和带宽范围。
- （2）在计算绿波带宽之前，先计算协调方向的红灯时间，它由相交叉道路方向的机动车或相应的行人绿灯时间加上绿间隔时间得出。
- （3）若设计一个等宽的绿波带，则带宽为系统周期时长减去某交叉口的红灯时间和绿灯间隔时间（该交叉口的红灯时间在各协调交叉口中最大）。如果出现局部绿波变窄时，整体绿波宽度保持不变。
- （4）需在确定最终的绿灯时长前，进行通行能力检验。

3.3.2.2 数解法

确定线控系统相位差的另一种方法便是数解法，它通过一定的计算步骤，来获得最优的相位差，它的基本思路是通过寻找系统中各实际信号距理想信号的最大位移量最小为目标，研究确定相位差，得到最后的结果。

其计算步骤如下：

- （1）计算各个交叉口之间的理想间距，定为 a 列。
- （2）计算 b 列，将实际信号位置与理想信号的挪移量按顺序排列，并计算各相邻诸一辆之差，将此差值之最大者计入 b 列。

- (3) 确定最合适的理想信号位置。
- (4) 做连续行驶通过带。
- (5) 计算时差。

3.3.3 绿波带控制中的辅助信号设计

当采用绿波控制时,为了提高交通管理的效益,可以设置速度信号标志。速度提示信号向驾驶员推荐一个稳定的行驶车速,从理论上说,若车辆以该速度行驶,则能不停车地通过下游信号控制的交叉口。速度提示信号的主要适用场合包括:

- (1) 在采用推荐速度能达到很好的协调效果时,决定绿灯的起亮时刻。
- (2) 协调相邻交叉口的配时,弥补周期不同对绿波带的影响。

(3) 避免车队的离散,例如,在绿波控制系统中交叉口间距较大或者在交叉口进口到上的信号灯较晚时才能被发现时。

若没有绿波的期望行驶车速提示,则车队通常不可能保持在时距图设计的绿波带宽中行驶。通过降低车队头部车辆的车速和提高车队尾部车辆的车速,使车辆行驶到下游交叉口时能保持较好的车队形式。而且,当车队行驶到交叉口时,驾驶员良好的驾驶行为也有助于改善交叉口的安全状况,尤其是在控制信号从绿灯转换到红灯时显得特别重要。

当车队的行驶车速在路段上偏差大于5km/h时,建议在通过交叉口的出口路段设置速度提示信号^[44]。当路段距离较长时,需要沿路段设置多个速度提示信号。

显示车速通常在允许车速范围内变动,即当车辆以该车速行驶时能够在下游交叉口绿灯结束前通过停车线,最低的建议通过车速应允许车辆在到达下游交叉口,并最多等待一个周期时间后,在放行绿灯时间内能够通过。在实际应用中,当建议车速低于40km/h时,驾驶员很难遵守。因此,显示车速不应低于40km/h^[44]。

在畅通路段上,建议车速一定不能与最高允许车速相冲突。也就是说,建议车速大于最高允许车速时,应修改原设计车速的取值。

速度提示信号的显示和切换时间可以从时距图中得到。速度提示信号的显示持续时间至少要5秒钟,以便驾驶员看清楚。

驾驶员须按照建议车速行驶,也就是说,建议的车速须根据实时的信号配时方案及时进行调整,尤其在下游交叉口的绿灯起步时间发生变化时。在任何情况下,当速度提示信号辨识不清或错误的时候,对交通系统的运行造成的不利影响都将超过不设置速度信号所造成的影响。如果不是在特殊的信号配时方案中,在协调方案不能运行或恶劣的天气条件和路况条件下,速度提示信号应被关闭。

为了改善驾驶员对建议车速的接受程度,使其理解设定低于最高允许行驶车速的建议车速,车速提示信号同时显示“绿波车速... km/h”将会非常有用。

“漏斗”式信号是速度提示信号的一项特殊设置。速度提示信号通过连接离散时的车辆形成完整车队的形式,使车辆在道路的第一个交叉口赶上绿波。从辅助信号的起始处开始,包括所有下游路段设置的辅助信号,一般总共有四种变化的车速显示,显示车速之间的相互差别可达到10km/h。为了防止前后两个车队的行驶间距过近或防止车队的离散,在

最高车速的显示信号关闭后，下游辅助信号系统的当前绿灯信号应显示“暗”或者黄闪。

在设计辅助信号系统时，最低建议车速值越高，在第一个辅助信号处的红灯时间就越长。图给出了时距图中设置富足信号的例子。

在设置辅助信号的路段，速度提示信号的设置距离间隔应大约为200-300米。

“漏斗式”信号是速度信号标志的一种特殊应用形式，它要求提示速度信号的变化从而使得随机跟车行驶的车辆逐渐汇集成车队，在长路段上行驶到第一个信号交叉口时碰到绿灯。

速度“漏斗”信号的长度由车队中按显示最快速度行驶的最后一辆车的行驶轨迹和后一车队中按显示最慢速度行驶的第一辆车的行驶轨迹间的交点决定。在交点的位置上必须设置第一组速度提示信号。显示的最低车速值越高，则“漏斗”信号的长度越长；速度“漏斗”信号经过的第一个交叉口的红灯时间越长，则速度“漏斗”信号越长。

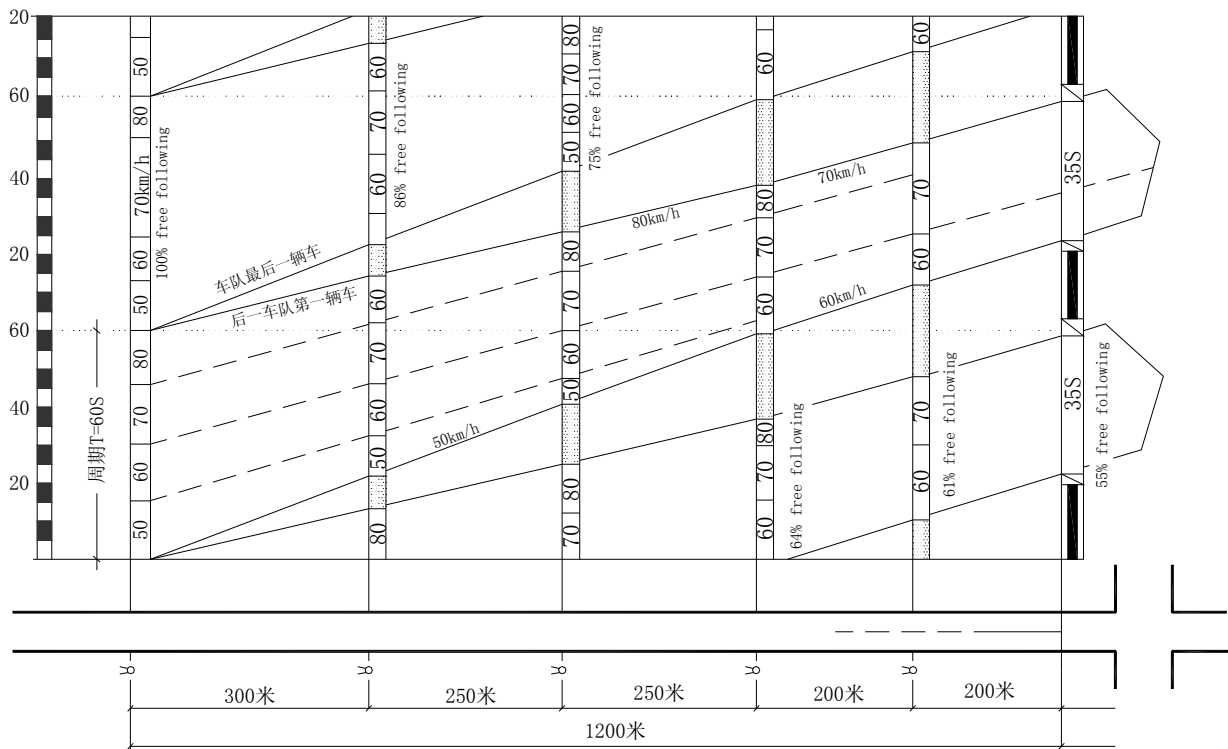


图 3-8 漏斗信号设计示例

3.3.4 绿波带信号控制方案的切换

不同的交通状况需要不同的绿灯时间分配、周期时长及相位差为代表的信号控制方案。控制方案的切换既要减少产生干扰，还要可以通过合理的控制技术来实现。通常绿波带控制系统中的信号控制方案切换分为以下四种^[44]：

(1) 所有交叉口同时切换

所有交叉口的信号方案必须在切换过程的相同步骤中具有固定的切换点。如果需要切换，整个交叉口群在切换点直接切换，不产生空闲时段。联动方向的交通流可能受到干扰。但在所有信号方案中找到与各自切换步骤相一致的信号状态，从规划角度看是很困难的。

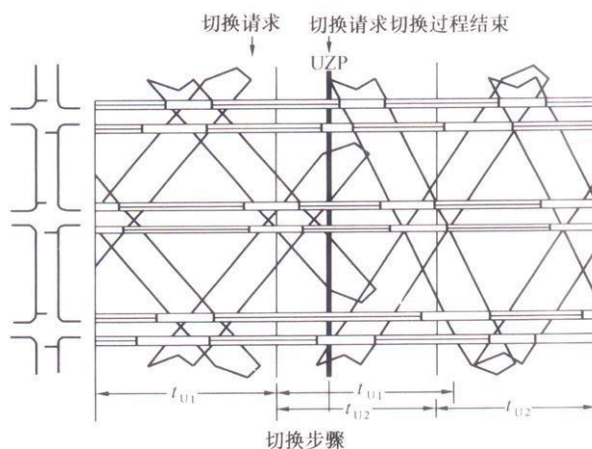


图 3-9 直接切换的示例

(2) 含空闲时段的切换

所有信号控制交叉口同时产生切换需要。直到最后一个切换结束，整个协调控制交叉口群才全部完成切换，所需时间与切换时间最长的单个交叉口所用时间相等，但至多持续两个周期减去两个步长。如果没有采取进一步的措施减少空闲时段，交通流可能会由于一段时间内协调被打破而受到严重的干扰。

如果主要方向负荷很大，且另一方向占次要地位，通过在主要方向设置切换点，较长的空闲时段是可以接受的。

空闲时段使绿灯时间延长，很大程度上能够清空进口道的排队车辆。这种切换方式只推荐用于在进口道不是很长，且在切换过程中，道路进口处的交通量不是很大时。否则，将产生相反的结果。

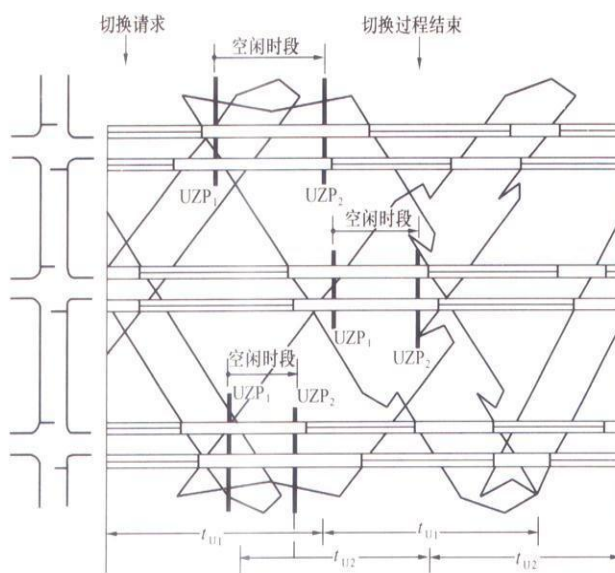


图 3-10 包含空闲时段的切换的示例

(3) 一个方向优先的逐步直接切换

在所有信号方案中，切换点必须安排在使系统的所有交叉口在优先方向同时处于绿灯

状态或同时处于红灯状态的时候。最重要的是，在每个交叉口，切换点 UZP_2 必须相关于切换点 UZP_1 这样来设置，如果直接切换，可以保证心得信号方案间的协调。

如果存在切换的需要，在优先方向最先切换的交叉口需到达切换点（ UZP_1 ）。切换序列（I，II，III，……）从第一个交叉口开始，与相应的车队同时或在其通过之后，从上游交叉口到达下游交叉口，逐个切换。

这样至少一个方向的交通流不受到干扰。如果切换点处于这一主要方向，新旧信号方案的推进速度在时间—距离图上不应差别过大。但是，如果切换点处于次要方向的绿灯时间内，且切换发生车队通过各个交叉口后，最好考虑采用不同的推进速度。

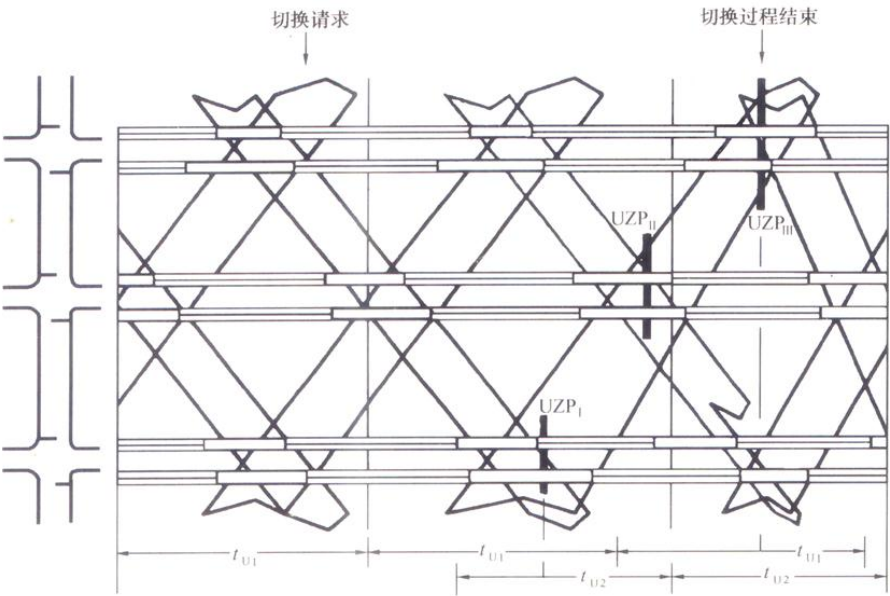


图 3-11 渐进式直接切换的示例

（4）通过切换程序实现兼顾两个方向的切换

在信号方案中，切换点被安排在使得系统的所有交叉口两个协调方向都处于绿灯或都处于红灯状态的时候。此外，在每个交叉口力求将新信号方案间的协调可得到保证。最佳切换点的确定大多数情况下只有通过切换信号程序才能完成。满足上述条件后，所有交叉口将形成固定的切换顺序。如果存在需求，必须等待第一个固定切换点（ UZP_1 ）的到达，然后根据给定的顺序进行切换（I，II，III，……）。

切换信号程序也能根据信号方案中车队相遇的交叉口来决定。

这一过程可以至少实现无扰动切换。切换频率之手切换过程自身的持续时间限制。

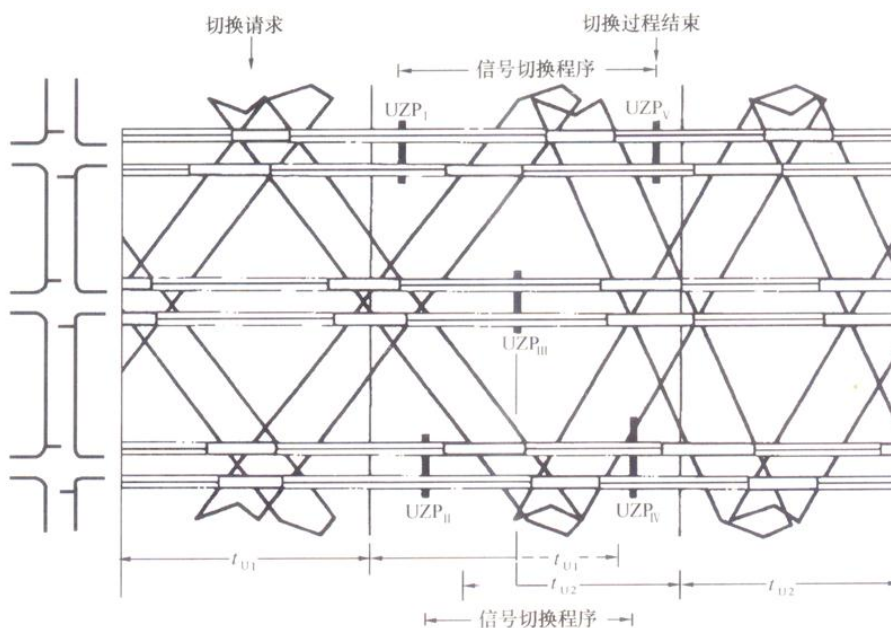


图 3-12 采用切换程序的信号切换示例

3.4 小结

本章的研究内容为绿波带控制原理。

城市主干道绿波带控制作为一种特殊的干线协调控制方式，本章第一节首先从城市交通干线系统入手，通过描述城市交通干线系统的运行特点，对干线系统协调控制的方式、控制目标进行了归纳总结，并且对目前应用较广泛的几款主流协调控制系统进行了简要的比较分析。然后对绿波带控制的基本原理进行了介绍，包括绿波带的概念、绿波带的类型以及绿波带控制的约束条件三部分。最后从绿波带设计的空间要求、绿波带配时设计方法、绿波带控制中的辅助信号设计和绿波带信号控制方案的切换四个方面对绿波带的设计方案进行了阐述。

4 绿波带控制优化研究

本章通过对双向绿波的模型：延误、排队长度和停车率，这些多目标问题的进行控制优化以达到对交通干线的双向绿波的控制目的，从而对城市主干道的绿波带控制进行进一步研究。

4.1 多目标优化基本概念

对于现实中的很多科学研究和工程实际问题都是涉及到多问题的，也就是说问题的解决研究是多目标的，求解问题的解都是解集，通常都是对应于求解Pareto解集。多目标优化就是对于研究多目标问题，由于其目标之间是相互地影响和制约，其不能使每个目标都能得到唯一最优解，而只能得到优化解集，即Pareto 解或者非最劣解(None-Dominated)。也就是说，在整个问题的求解过程中，优化所得到的解是对于整个问题系统的是最有的，最能满足整个问题的目标。由于对于求解问题的最大或者最小解集在数学中是可以相互转换的，那么通常的多目标优化最广泛采用和最被普遍接受的定义如下：

对于一般的多目标优化问题，有 n 个决策变量，即 $x \in R^n$ ，有 m 个目标向量，即 $y \in R^m$ ，同时还存在一些约束条件，在问题表示为

$$\max y = f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]$$

s.t.

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots$$

$$h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots$$

其中， $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$
 $y = (f_1, f_2, \dots, f_m)$

而对于多目标优化问题，在很多情况下各目标之间的求解都是相互冲突的，对于某个目标的改善求解可能使其他目标的性能降低，因此只能得到使整个系统的性能最优的解集。为了更形象地表示出多目标优化求最优解集，在这令多目标优化问题中有两个目标函数 $F_1(X)$ 和 $F_2(X)$ ，则如图4-1所示。

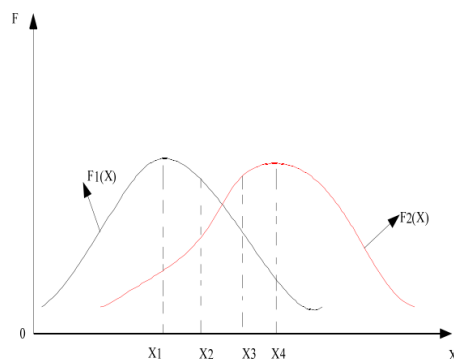


图 4-1 多目标问题求解

对于此多目标优化问题,假设是求最大的解 $\max F(X)$,而单独求 $F_1(X)$ 和 $F_2(X)$ 的最大的最大解时,可知在 X_1 处 $F_1(X)$ 可取得最大值 $\max F_1(X)$,但是此处的 $F_2(X)$ 得到值是很不理想,同理在 X_2 处 $F_2(X)$ 可取得最大值 $\max F_2(X)$,但是 $F_1(X)$ 得到值也是很不理想。但是当考虑两目标函数都要取得极大值时,却不能得到确定的唯一解 X ,此时只能得到使两目标函数最优的解集 $[X_1, X_2]$ (一般称为Pareto解集)使得两目标函数有最优解 $\max [F_1(X), F_2(X)]$ 。

4.2 粒子群优化算法的基本理论

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[24]是一种基于群智能(Swarm Intelligence)方法的演化计算(Evolutionary computation)技术。PSO同遗传算法类似,是一种基于群体(Population)的优化工具。对所求问题的系统中群体首先初始化为一组随机解,然后通过对粒子群迭代搜寻最优值。在此并没有使用遗传算法的交叉

(Crossover)和变异(Mutation)等操作,而是粒子(可能的解)在定义的解空间中跟随最优的粒子来进行搜索求解。相对于遗传算法而言,PSO算法简单、容易实现和理解,同时又有一定的智能背景,很适合科学研究和工程实际的应用。因此,PSO算法一提出,就立刻引起了智能计算等领域中研究人员的广泛关注,并在短短的几年时间里出现大量的研究成果,形成了一个研究热点。但是目前国内对PSO的研究还不是很多,部分专家和研究者都对其进行了深入的研究,也提出了很多的改进算法,并把其很好地运用到实际问题的求解和优化中,得到了很好的效果。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是由Kennedy和Eberhart于1995年提出的^[25],受到人工生命(Artificial Life)的研究结果启发,PSO的基本概念源于对鸟群捕食行为的研究。设想这样一个场景:一群鸟在随机搜寻食物,在这个区域里只有一块食物,所有的鸟都不知道食物在那里,但是他们知道当前的位置离食物还有多远。那么找到食物的最优策略就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。PSO从这种模型中得到启示并用于解决优化问题。PSO中,每个优化问题的潜在解都是搜索空间中的一只鸟,称之为“粒子”。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值(fitnessvalue),每个粒子还有一个速度决定他们飞翔的方向和距离。然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索。PSO初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解称为个体极值(Personal Best)。另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值(Global Best)。另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值。

后来粒子群算法得到进一步发展,出现了目前广泛使用的标准PSO算法^[26]。由于PSO概念简单、容易实现并且没有许多参数需要调整,同时又有深刻的智能背景,既适合科学计算,又特别适合实际工程应用,因此现在已经出现很多种改进的PSO算法。

4.2.1 粒子群优化算法的原理

粒子群优化算法(PSO)与其他演化算法相似,也是基于群体的。记目标搜索空间中有N个粒子组成一个群体,每一个粒子被随机初始化以表示一个可能的解,并在解空间追随最优的粒子进行搜索。根据对环境的适应度将群体中的个体移动到好的区域,将每个个体看作是D维搜索空间中的一个没有体积的粒子(点),在搜索空间中以一定的速度飞行,这个速度根据它本身的飞行经验和同伴的飞行经验来动态调整^{[27][26]}。

设第i个粒子表示为 $X_i=(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$,它经历过的最好的位置(也就是有最好的适应值的)可以记为 $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$,也可记为 P_{best} 。群体中所有粒子经历过的最好位置的索引号用g表示,记为 $P_g(P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd})$,记为 g_{best} 。粒子i的飞行速度也是D维向量,记为 $v_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。对于每一代,它的第d维($1 \leq d \leq D$)根据下面的方程进行变化更新:

$$V_{id} = w \cdot v_{id-1} + c_1 \cdot random() \cdot (P_{id-1} - x_{id-1}) + c_2 \cdot Random() \cdot (P_{id-1} - x_{id-1}) \quad (4-1)$$

$$x_{id} = x_{id-1} + v_{id-1} \quad (4-2)$$

其中,w为惯性权重(Inertia weight), c_1 和 c_2 为学习因子(或者称为加速度系数Acceleration constants),通常取 $c_1=c_2=2$,代表将每个微粒推向 P_{best} 位置的统计加速项的权重,random()和Random()为两个服从U(0,1)分布的相互独立的随机函数。

4.2.2 粒子群优化算法的步骤

由以上对粒子群算法(PSO)基本原理的描述,可对粒子群算法的基本步骤描述如下:

- (1) 首先对粒子群进行初始化,包括粒子的起始位置 X_{ij} 和初始速度 V_{ij} 。
- (2) 对每个粒子的约束适应度和目标适应度进行计算与评价,为以后的判断创建条件。
- (3) 对每一个粒子,将其目标适应值与其经历过的最好位置 P_{best} 作比较,如果较好,则用当前的适应度值作为当前的最好位置 P_{best} 。
- (4) 对每个粒子,计算其邻域范围,求解最好的局部位置和全局位置。
- (5) 根据方程(4-1)来重新求出粒子的速度和位置。
- (6) 对粒子的适应度以及算法确定的运算次数进行判断,如果满足则算法结束,否则返回步骤(2)。

4.2.3 粒子群优化算法的特点

虽然粒子群(PSO)算法的功能与遗传算法非常相似,并且同其他优化算法一样能够很好地优化问题,求出满足问题需求的解。但是其实现技术却有如下五个显著的优点:

- (1) 无交叉和变异运算,依靠粒子速度完成搜索。
- (2) 粒子群算法(PSO)以经历最好适应值为标准,来决定子代替换父代。
- (3) 有记忆性,粒子和群体的历史最好位置可以记忆并传递给其他粒子。

(4) 算法在迭代求解中同时保存粒子的速度和位置,并形象地给出进行寻优过程的方程。

(5) 需调整的参数较少,结构简单,易于实现。

(6) 采用实数编码,直接由问题的解决定,问题解的变量数直接作为粒子的维数。

(7) 收敛速度快,在迭代进化中只有最优的粒子把信息传递给其他粒子,属于单向信息流动。

4.3 绿波带控制优化

4.3.1 前提假设条件

在推导建立双向绿波的模型前,现在给出两个基本假设:

(1) 干线的每个交通控制信号周期中不考虑黄灯,只有绿灯和红灯组成。

(2) 干线的每个交通控制信号周期中的相序和相位数量是确定不变的,并且在每个相位之间不设置时间间隔。

(3) 相邻的两路口有一定距离,一般情况下都是假定在800m左右,当两个交叉口较近同时车流量较大时,可把两交叉路口视为一个交叉口。

4.3.2 绿波带控制模型的建立

在干线交通的双向绿波控制系统中周期时长、绿信比以及相位差三个基本参数是非常重要的,也是建立双向绿波模型的关键参数。

(1) 周期时长

在双向绿波控制系统中,为使各交叉口的交通信号能取得协调,各个交通信号的周期时长 T 必须是相同的。因此,必须先按单点定时信号的配时方法,根据系统中各交叉口的布局及交通流向、流量,计算出各个交叉口交通信号所需的周期时长,然后从中选出最大的周期时长作为这个系统的周期时长,把需要周期时长最大的这个交叉口叫做关键交叉口。对于四相位交叉口,最小周期 $T_{\min} = 36s$,最大周期为 $T_{\max} = 150s$ 。

(2) 绿信比

在双向绿波控制系统中,各个信号的绿信比 λ 是根据各个交叉口各向交通量的流量比确定的。因此,绿波系统中每个交叉口信号的绿信比不一定是相同。由于干线的考虑四相位的交叉口,通常要求每一相绿灯信号时间不小于15s,则有:

$$\lambda_{\min} = \frac{15}{T}, \lambda_{\max} = \frac{T-15}{T} \quad (4-3)$$

(3) 相位差

要使绿波系统得到大的绿波带,必须协调相邻信号间的绿时差,以达到减少延误、排队长度和停车次数的目的。所以相位差 ϕ 是交通控制系统实现双向绿波协调控制的很关键的参数。

依据上述假设条件,本文以两相邻交叉口来分析建立绿波带控制模型,如图4-2所示

的交叉口示意图。在此我们考虑干线双交叉口的车辆的平均延误、排队长度和停车率^{[31][32]}。

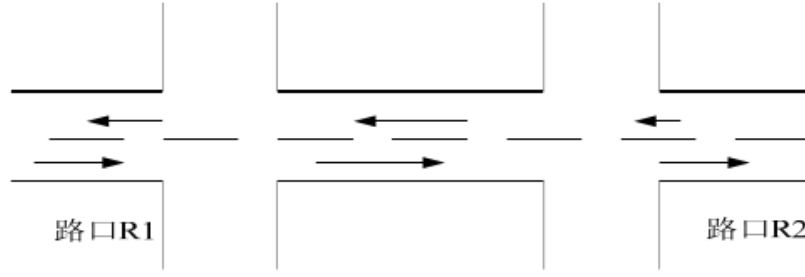


图 4-2 相邻两交叉口双向交通示意图

在此处令路口R₁和路口R₂之间的距离为L，设由路口R₁到路口R₂车速为v₁₂（上行方向），由路口R₂到路口R₁车速为v₂₁（下行方向）。周期为T，路口R₁与路口R₂之间的相位差为φ₁₂，其中车流量已知（可由交通信息检测器获取），上行方向和下行方向分别记为q_上和q_下。

4.3.2.1 平均延误

要使干线的双向绿波实现，首先就要使车辆通过各交叉口的平均延误最小^{[28][29][30]}，在此就先建立交叉口的平均延误模型。

（1）由路口R₁到路口R₂的延误分析

由路口R₁到路口R₂的上行车辆的时间为 $\frac{L}{v_{12}}$ ，此时车辆的平均延误可分为两种情况：

- ① 对于上行的车辆，当车队的头部到达路口R₂时刚好遇见红灯受阻；
- ② 对于上行的车辆，当车队尾部到达路口R₂时遇见红灯受阻；

对于第一种情况有，有图4-3所示，车队头部到达路口R₂，一直到路口R₂的红灯结束的时间为τ_上，则有

$$\left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod(T) + \tau_{\text{上}} = \phi_{12} \quad (4-4)$$

$$\tau_{\text{上}} = \phi_{12} - \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod(T) \quad (4-5)$$

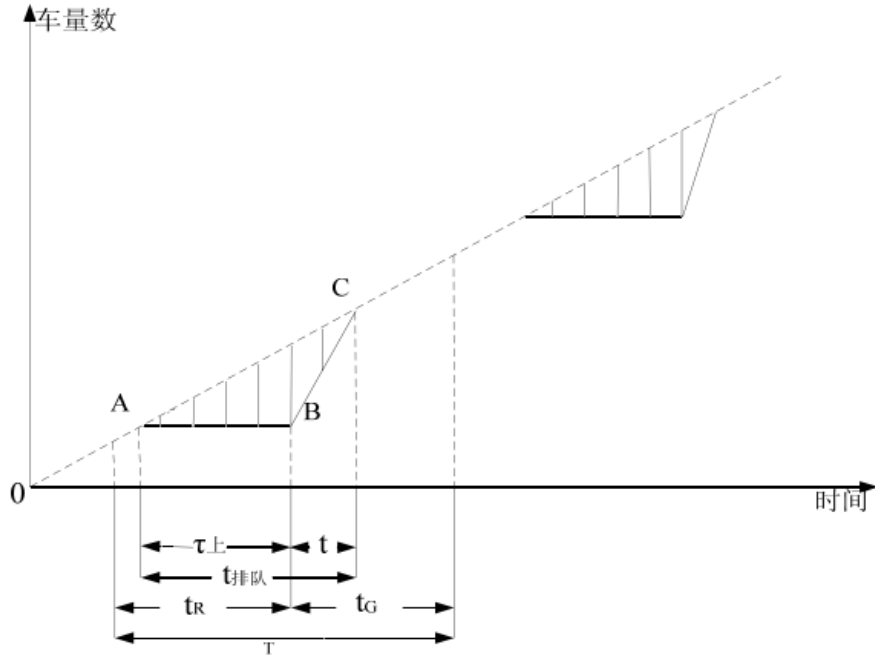


图 4-3 车队头部受阻情况

设在绿灯时间内，干线的交叉口的车流量的最大通行能力为 μ 。在图4-3所示的车头受阻情况中，其中 T 为交通信号周期， t_R 为一个交通信号周期中红灯的时间， t_G 为一个交通信号周期中绿灯的时间， t 为在绿灯开启后排队车辆全部疏散的时间， $t_{\text{排队}}$ 为车辆的排队时间。

在绿灯开启 t 后，排队积存的车辆已经全部疏散结束，此后到达的车辆可以不受阻碍地通过交叉口，由此有

$$q_{\text{上}}(t + \tau_{\text{上}}) = t \cdot \mu \quad (4-6)$$

可得疏散时间

$$t = \frac{\tau_{\text{上}} q_{\text{上}}}{\mu - q_{\text{上}}} \quad (4-7)$$

则有上行车队的车头受阻情况下，在 R_2 交叉口总的延误值可用图4-3中三角形面积，即是 $S_{\triangle ABC}$ ，在此记为 $d_{\text{上}}$ ，可得：

$$d_{\text{上}} = S_{\triangle ABC} = \frac{1}{2} \tau_{\text{上}} q_{\text{上}} (\tau_{\text{上}} + t) \quad (4-8)$$

结合 (4-7) (4-8) 可得：

$$d_{\text{上}} = \frac{1}{2} \tau_{\text{上}} q_{\text{上}} \left[\tau_{\text{上}} + \frac{\tau_{\text{上}} q_{\text{上}}}{\mu - q_{\text{上}}} \right] = \frac{1}{2} \frac{\tau_{\text{上}}^2 q_{\text{上}} \mu}{\mu - q_{\text{上}}} \quad (4-9)$$

把 (4-5) 代入 (4-9) 式可得：

$$d_{\text{上}} = \frac{q_{\text{上}} \mu \left\{ \phi_{12} - \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod (T) \right\}^2}{2(\mu - q_{\text{上}})} \quad (4-10)$$

时距图如图4-4所示：

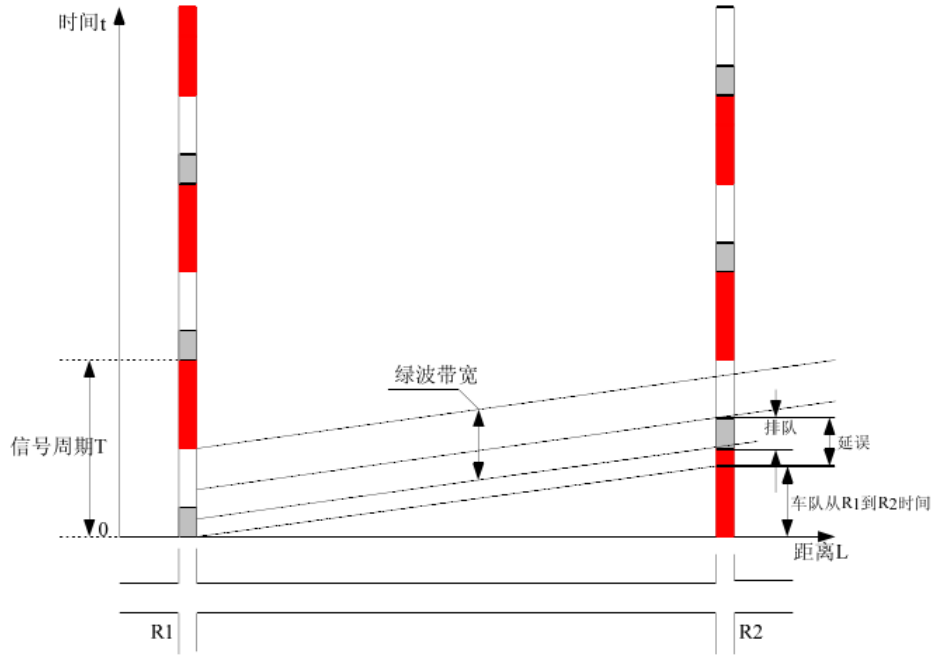


图 4-4 由 R1 到 R2（上行）车队头部受阻时距图

对于第二种情况，如图4-5所示，当车队尾部到达R₂时受阻，此时的车辆要等到下一周期的绿灯开启后才能通过交叉口，设此时的车队受阻中的第一辆车到达遇见红灯后到剩余车队都停在交叉口R₂时的时间为 $\tau'_{\text{上}}$ ，则有：

$$\left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod (T) - \tau'_{\text{上}} = \phi_{12} \quad (4-11)$$

$$\text{即 } \tau'_{\text{上}} = \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod (T) - \phi_{12} \quad (4-12)$$

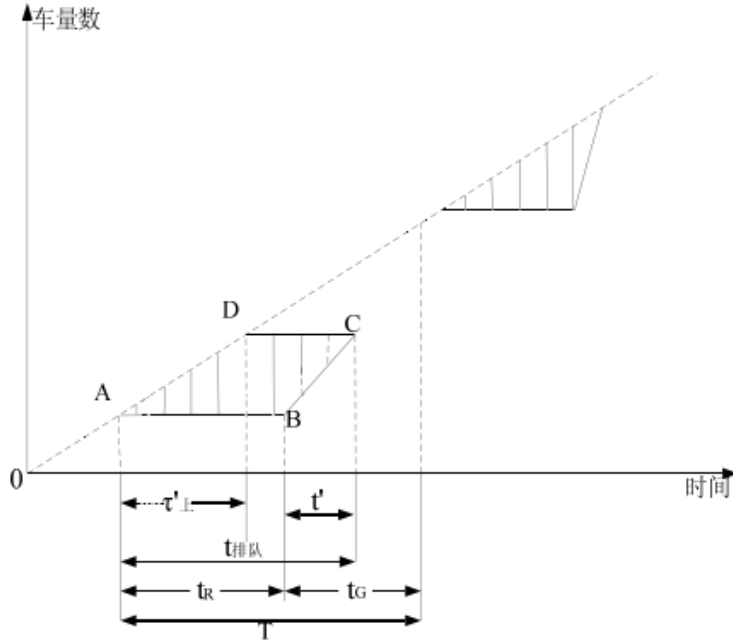


图 4-5 车队尾部受阻情况

可知车队中余下 $\tau'_{\perp} q_{\perp}$ 车辆没有能够通过交叉口 R_2 ，需要等到下周期绿灯开启后通过。当绿灯开启后如图4-5中所示这些车辆要 t' 时间这些车辆才能完全疏散，同时在 t' 中，由路口 R_1 开来的车还没有到达路口 R_2 ，故有

$$q_{\perp} \tau'_{\perp} = t' \mu \quad (4-13)$$

根据 (4-13) 求得疏散时间：

$$t' = \frac{q_{\perp} \tau'_{\perp}}{\mu} \quad (4-14)$$

同第一种情况讨论的相似，在此交叉口的车队的总的延误，可以由图 4-5 中多边形的面积求出，即对应于图中的多边形 ABCD 的面积，在此记为 d'_{\perp} ，可得：

$$d'_{\perp} = \frac{1}{2} q_{\perp} \tau'^2_{\perp} + q_{\perp} \tau'_{\perp} (t_R - \tau'_{\perp}) + \frac{1}{2} t' q_{\perp} \tau'_{\perp} = q_{\perp} \tau'_{\perp} t_R - \frac{1}{2} q_{\perp} \tau'^2_{\perp} + \frac{1}{2} t' q_{\perp} \tau'_{\perp} \quad (4-15)$$

将 (4-12) 与 (4-14) 代入 (4-15)，则

$$d'_{\perp} = q_{\perp} t_R \left\{ \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod (T) - \varphi_{12} \right\} - \frac{1}{2} q_{\perp} \left\{ \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod (T) - \varphi_{12} \right\}^2 + \frac{1}{2} q_{\perp}^2 \frac{\left\{ \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod (T) - \varphi_{12} \right\}^2}{\mu} \quad (4-16)$$

此时时距图如图4-6所示：

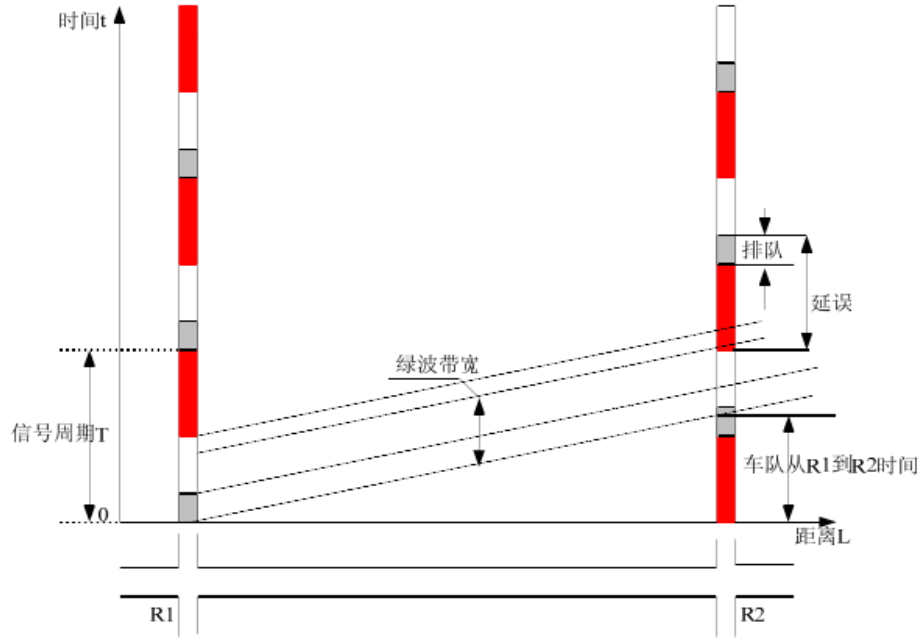


图 4-6 由 R1 到 R2（上行）车队尾部受阻时距图

由以上的两种情况的讨论,可知对于干线的车辆行驶中,车队的延时计算有两种算法:

$$\begin{cases} \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod(T) - \phi_{12} \leq 0, & \text{按照第一种情况计算车队的延时;} \\ \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod(T) - \phi_{12} > 0, & \text{按照第二种情况计算车队的延时;} \end{cases}$$

因此对于车辆由交叉口R₁到交叉口R₂的上行行驶时,车辆在交叉口处的总时间延误可以由(4-10)式与(4-16)式共同表示为如下:

$$D_{\text{上}} = \alpha d_{\text{上}} + (1 - \alpha) d'_{\text{上}} \quad (4-17)$$

α 为自定义的系数。当车队头部受到阻碍时, $\alpha = 1$; 当车队尾部受到阻碍时, $\alpha = 0$ 。

(2) 由路口R₂到路口R₁的延误分析

现设定交通干线中,由路口R₂到路口R₁的设为下行方向,设此时的相位差为 ϕ_{21} , 则有两交叉口的相差满足:

$$\phi_{12} + \phi_{21} = T \quad (4-18)$$

其分析同上行方向车流分析一样,分两种情况讨论:

③ 对于下行的车辆,当车队头部到达路口R₁时遇见红灯受阻。

④ 对于下行的车辆,当车队尾部到达路口R₁时遇见红灯受阻。

对于第三种情况,同上行方向分析相似。当车队头到路口R₁时,遇见红灯,设此时红灯时间为 $\tau_{\text{下}}$, 则:

$$\left\lceil \frac{L}{v_{21}} \right\rceil \bmod(T) + \tau_{\text{下}} = \phi_{21} \quad (4-19)$$

$$\tau_{\text{下}} = \phi_{21} - \left[\frac{L}{v_{21}} \right] \bmod(T) \quad (4-20)$$

令此时车队要疏散通过交叉口所需要的时间为 $t_{\text{下}}$ ，在此时间后的车辆都将顺利通过交叉口，可有：

$$q_{\text{下}}(t_{\text{下}} + \tau_{\text{上}}) = t_{\text{下}} \cdot \mu \quad (4-21)$$

故疏散时间：

$$t_{\text{下}} = \frac{\tau_{\text{下}} q_{\text{下}}}{\mu - q_{\text{下}}} \quad (4-22)$$

故下行方向的延误为：

$$d_{\text{下}} = \frac{1}{2} \tau_{\text{下}} q_{\text{下}} (\tau_{\text{下}} + t_{\text{下}}) = \frac{q_{\text{下}} \mu \left\{ \phi_{21} - \left[\frac{L}{v_{21}} \right] \bmod(T) \right\}^2}{2(\mu - q_{\text{下}})} \quad (4-23)$$

由（4-20）（4-22）可得：

$$d_{\text{下}} = \frac{1}{2} \tau_{\text{下}} q_{\text{下}} (\tau_{\text{下}} + t_{\text{下}}) = \frac{q_{\text{下}} \mu \left\{ T - \phi_{12} - \left[\frac{L}{v_{21}} \right] \bmod(T) \right\}^2}{2(\mu - q_{\text{下}})} \quad (4-24)$$

此时时距图如图4-7所示：

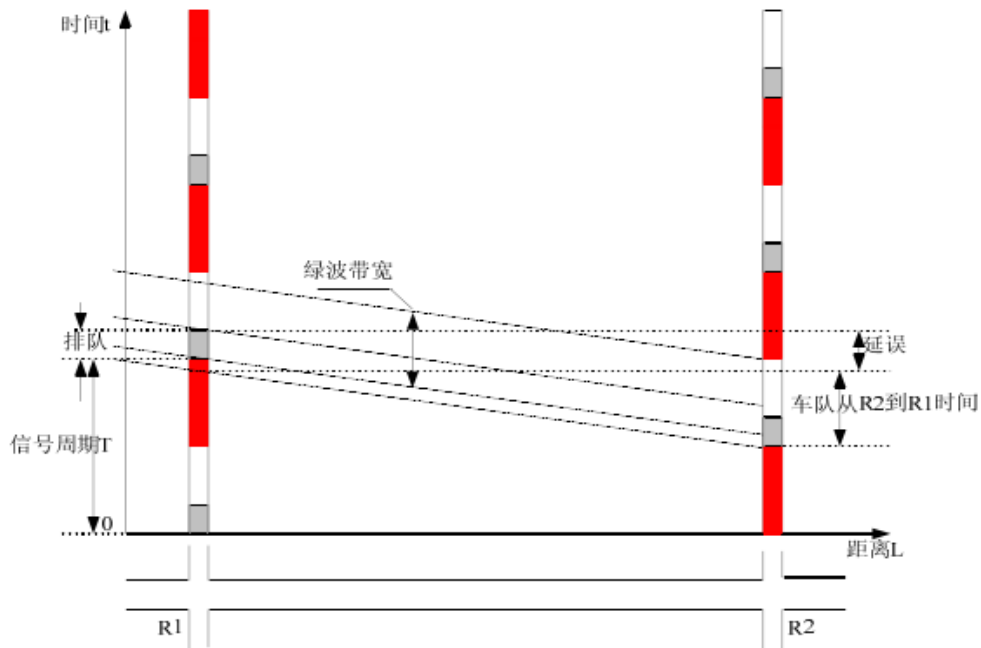


图 4-7 由 R2 到 R1（上行）车队头部受阻时距图

对于第四种情况，车队没有完全通过交叉口时遇见红灯，即车队尾部受到阻碍，设 $\tau'_{\text{下}}$ 为车队中的受阻车辆到达交叉口的消耗时间，则

$$\left\lceil \frac{L}{v_{21}} \right\rceil \bmod(T) - \tau'_{\text{下}} = \varphi_{21} \quad (4-25)$$

$$\text{即 } \tau'_{\text{下}} = \left\lceil \frac{L}{v_{21}} \right\rceil \bmod(T) - \varphi_{21} \quad (4-26)$$

$$d'_{\text{下}} = \frac{1}{2} q_{\text{下}} \tau'^2_{\text{下}} + q_{\text{下}} \tau'_{\text{下}} (t_R - \tau'_{\text{下}}) + \frac{1}{2} t' q_{\text{下}} \tau'_{\text{下}} = q_{\text{下}} \tau'_{\text{下}} t_R - \frac{1}{2} q_{\text{下}} \tau'^2_{\text{下}} + \frac{1}{2} t' q_{\text{下}} \tau'_{\text{下}} \quad (4-27)$$

将 (4-18) 与 (4-26) 代入 (4-27)，则下行方向的延误为：

$$\begin{aligned} d'_{\text{下}} = & q_{\text{下}} t_R \left\{ \left\lceil \frac{L}{v_{21}} \right\rceil \bmod(T) - T + \varphi_{12} \right\} - \frac{1}{2} q_{\text{下}} \left\{ \left\lceil \frac{L}{v_{21}} \right\rceil \bmod(T) - T + \varphi_{12} \right\}^2 \\ & + \frac{1}{2} q_{\text{下}}^2 \frac{\left\{ \left\lceil \frac{L}{v_{21}} \right\rceil \bmod(T) - T + \varphi_{12} \right\}^2}{\mu} \end{aligned} \quad (4-28)$$

此时时距图如图4-8所示：

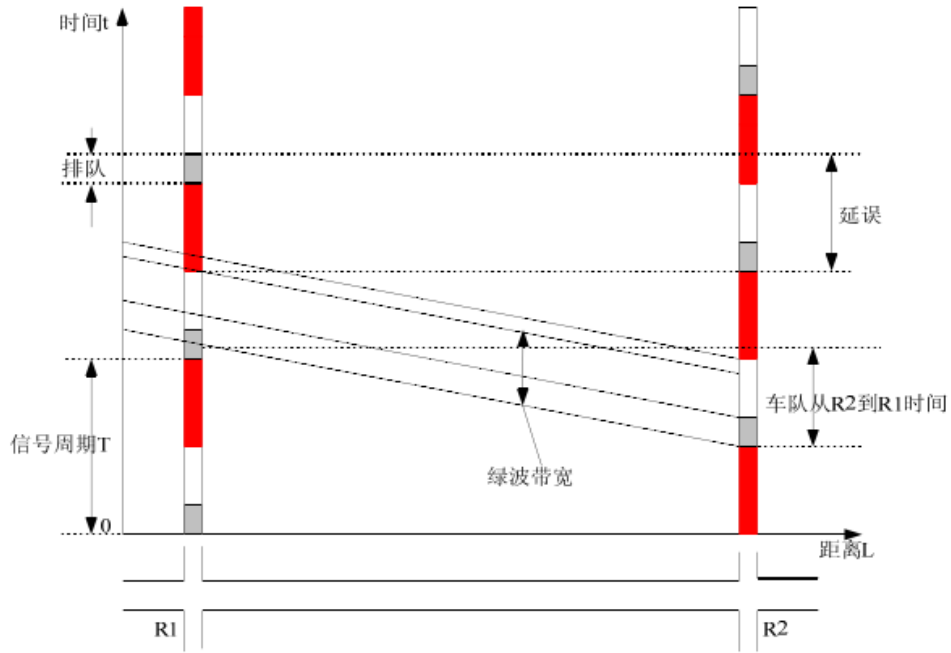


图 4-8 由 R2 到 R1（上行）车队尾部受阻时距图

通过对上述两种情况的讨论，可知对于干线的车辆行驶中，车队的延时计算有两种算法：

$$\begin{cases} \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod(T) - T + \varphi_{12} \leq 0, & \text{按照第三种情况计算车队的延时;} \\ \left\lceil \frac{L}{v_{12}} \right\rceil \bmod(T) - T + \varphi_{12} > 0, & \text{按照第四种情况计算车队的延时;} \end{cases}$$

由此对于车辆由交叉口R₂到交叉口R₁的下行行驶时，车辆在交叉口处的总时间延误可

以由（4-24）式与（4-28）式共同表示为如下：

$$D_{\text{下}} = \beta d_{\text{下}} + (1 - \beta) d'_{\text{下}} \quad (4-29)$$

其中 β 为自定义系数。当车队头部受到阻碍时， $\beta = 1$ ；当车队尾部受到阻碍时， $\beta = 0$ 。

由以上的图4-4、图4-6、图4-7、图4-8可知，对于单独考虑单向的绿波而言，要使绿波带最大化，使交通流比较顺利，必须使单向的绿信比加大或者使变动相位差。同时可以看出对于干线上单向车速较高时，相位差要小些，而对于干线上单向车速较小时，相位差要大些。但是当对双向绿波实现时，要使绿波带最大化，就要同时考虑相位差的选取，因为当使其中单向的一个绿波带最大使，可能对另一相反方向的绿波带很小。

4.3.2.2 排队长度

排队长度是衡量交通控制系统的重要性能指标，国内外很多研究人员也都对此进行过研究。在一般的定时的交通控制中，排队长度是由道路交通的通行能力和整个交通流量决定的。而一般在干线的协调控制中，一些控制信号都是动态调节的，这些分析都牵涉到排队论、随机过程、概率论等方法来建立排队长度。

对交叉口处的排队长度可以分为三种情况：非饱和情况下的排队长度、饱和情况下的排队长度、过饱和情况下的排队长度。并且，在交通控制的发展过程中，提出过很多种排队模型。在这我们所说的排队长度都是说在交叉口由于遇见红灯而停车的情况下的所形成的车队长度，下面就干线交通的控制中的车队的交叉口排队长度建立进行讨论。

本文只考虑的是在非饱和情况下的干线交通绿波控制，本文在此考虑建立的模型为：

$$Q = Q_0 + Q_r$$

其中， Q_0 表示在绿灯开始前交叉口车辆的排队；

Q_r 表示在红灯开始前，车辆排队长度，

$$Q_0 = \frac{\exp\left\{-\left(\frac{4}{2}\right)(\lambda \times T \times \mu)^{0.5} \times \frac{1-x}{x}\right\}}{2(1-x)} \quad [33],$$

$$\text{其中 } x \text{ 为饱和度 } x = \frac{q}{\mu} \times \frac{1}{\lambda}$$

对于城市主干道绿波带控制左如下讨论：

（1）对于由路口 R_1 到路口 R_2 （上行方向）

$$Q_{\text{上}} = Q_{\text{上}0} + Q_r \quad (4-30)$$

其中， $Q_{\text{上}}$ 为上行方向绿灯开始前的车辆排队长度，

Q_r 为上行方向红灯期间的车辆排队长度，

$$Q_r = q_{v1} \times \tau_R, \quad \text{其中 } q_{v1} = q_{\text{上}}, \tau_R = \tau_{\text{上}} \quad (4-31)$$

将（4-5）式代入（4-31）可得：

$$Q_r = q_{v1} \times \tau_R = q_{\text{上}} \times \tau_{\text{上}} = q_{\text{上}} \times \left\{ \phi_{12} - \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod (T) \right\} \quad (4-32)$$

$$\text{而 } Q_{\pm 0} = \frac{\exp\left\{-\left(\frac{4}{2}\right)(\lambda_{\pm} \times T \times \mu)^{0.5} \times \frac{1-x_{\pm}}{x_{\pm}}\right\}}{2(1-x_{\pm})} \quad (4-33)$$

由式 (4-32) 和 (4-33) 可知上行方向车流量排队长度为:

$$Q_{\pm} = \frac{\exp\left\{-\left(\frac{4}{2}\right)(\lambda_{\pm} \times T \times \mu)^{0.5} \times \frac{1-x_{\pm}}{x_{\pm}}\right\}}{2(1-x_{\pm})} + q_{\pm} \times \left\{ \varphi_{12} - \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod (T) \right\} \quad (4-34)$$

(2) 对于由路口R₂到路口R₁ (下行方向)

同理有 $Q_{\mp} = Q_{\mp 0} + Q'_{\mp}$

$$\text{其中, } Q_{\mp 0} = \frac{\exp\left\{-\left(\frac{4}{2}\right)(\lambda_{\mp} \times T \times \mu)^{0.5} \times \frac{1-x_{\mp}}{x_{\mp}}\right\}}{2(1-x_{\mp})} \quad (4-35)$$

$$Q'_r = q_{v2} \times \tau'_R = q_{\mp} \times \tau_{\mp} = q_{\mp} \times \left\{ \varphi_{21} - \left[\frac{L}{v_{21}} \right] \bmod (T) \right\} \quad (4-36)$$

又因为 $\varphi_{12} + \varphi_{21} = T$, 所以

$$Q_{\mp} = \frac{\exp\left\{-\left(\frac{4}{2}\right)(\lambda_{\mp} \times T \times \mu)^{0.5} \times \frac{1-x_{\mp}}{x_{\mp}}\right\}}{2(1-x_{\mp})} + q_{\mp} \times \left\{ T - \varphi_{12} - \left[\frac{L}{v_{21}} \right] \bmod (T) \right\} \quad (4-37)$$

排队长度的大小对于城市主干道绿波带控制有重要的影响,该排队模型当中式(4-34) (4-37) 的 Q_{\pm} 、 Q_{\mp} 分别代表模型中上下行双向的排队长度。

4.3.2.3 停车率

在干线的交通中,由于车辆在行驶过程中遇见红灯或者出现交通事故都可能出现停车现象。对于交通事故产生的停车现象我们是没有办法克制的,而对于遇见红灯引起的交通车辆停车的现象,我们可以通过对交通信号灯的配时来加以协调控制,来保证车辆在干线行驶的时候,尽量能够以全绿灯的情况通过交叉口,增加交通控制系统的运行效率。

停车率是一交通信号周期内车辆的停车次数,它同平均延误一样,也是衡量交通运行能力与交通控制的重要指标,也反映了干线交叉口的服务水平。随着交通控制的发展,许多研究者也提出很多的停车率的模型,如Transyt停车率模型、R. Akcelik停车率模型以、Webster等建立的经典模型以及CA(CellularAutomaton)交通流停车率模型,这些模型都是依据不同的侧重点来建立的,它们都是依据排队理论和随机过程的理论建立的,对于干线交通中,停车次数越小能够实现双向绿波的效果越好。

前面章节中对干线中的车流量已假设为 q_{\pm} 和 q_{\mp} ,那么在一周期中干线上行的车辆有 N ,

$$\text{即 } N = c \cdot q_{\pm} \quad (4-38)$$

若每个周期中的停车次数记为为S，则停车率h可表示为：

$$h = \frac{S}{N} \quad (4-39)$$

对于停车次数S，依据Cronje WB等通过Markov过程分析交通车流量建立车辆在干线行驶时的停车次数：

$$S = q_0 + q \left[\frac{q_r + q_0}{q_m - q} + r \right] \quad (4-40)$$

$$\text{其中 } q_0 = I \cdot \exp \left\{ - \left(\mu + \frac{1}{2} \mu^2 \right) \right\} \frac{1}{2} x(1-x); \quad (4-41)$$

q_m 为绿灯时饱和和释放流量；

$$\mu = (1-x)(q_m g)^{\frac{1}{2}};$$

$$x = \frac{qT}{q_m g}$$

在式(4-41)中的I代表在干线交通中，每个周期车辆的随即到达率与车辆的平均到达率之间的偏差，由于干线交通车辆的到达率在模型中假设为均匀的，可知此时偏差为零，即干线中I=0。故有：

$$h = \frac{S}{N} = \frac{q \frac{qr}{q_m - q} + r}{qT} \quad (4-42)$$

$$\text{简化可得： } h = \frac{1 - \frac{g}{T}}{1 - \frac{q}{q_m}} \quad (4-43)$$

由上可知在绿波带控制中，当车辆沿交叉口 R_1 到交叉口 R_2 上行方向行驶的时候，停车率 h_{\perp} 可表示为：

$$h_{\perp} = \frac{1 - \frac{t_G}{T}}{1 - \frac{q_{\perp}}{\mu}} \quad (4-44)$$

同理当车辆沿交叉口 R_2 到交叉口 R_1 下行方向行驶的时候，停车率 h_{\downarrow} 可表示为：

$$h_{\downarrow} = \frac{1 - \frac{t_G}{T}}{1 - \frac{q_{\downarrow}}{\mu}} \quad (4-45)$$

式(4-44) (4-45)两式中参数意义同前所述。

同时对以上停车率模型中的基本约束条件，即对干线交通中的绿信比 λ 、基本周期 T 的范围以及相位差 ϕ 作如下规定：

绿信比： $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ ；

相位差： $0 \leq \phi \leq T$

周期时长： $T = \max(T_i), i = 1, 2, \dots$ ，其中 T_i 为每个交叉口的周期。

4.3.2.4 绿波带控制模型建立

对于4.3.2.3中建立的绿波带控制模型，要实现双向绿波，必须使延误、排队长度和停车率达到最优，这样才能使干线上的双向车流以比较顺畅的绿波带向前行驶。此时我们才能考虑双向绿波控制，以达到最大的“双向绿波带”。本节就讨论建立双向带实现的模型。

对于建立的交通干线上双向绿波的延误、排队长度和停车率模型为：

$$D_{\text{下}} = \beta d_{\text{下}} + (1 - \beta) d'_{\text{下}} \quad (4-45)$$

$$D_{\text{上}} = \alpha d_{\text{上}} + (1 - \alpha) d'_{\text{上}} \quad (4-46)$$

$$Q_{\text{上}} = Q_{\text{上}0} + Q_r \quad (4-47)$$

$$Q_{\text{下}} = Q_{\text{下}0} + Q'_r \quad (4-48)$$

$$h_{\text{上}} = \frac{1 - \frac{t_G}{T}}{1 - \frac{q_{\text{上}}}{\mu}} \quad (4-49)$$

$$h_{\text{下}} = \frac{1 - \frac{t_G}{T}}{1 - \frac{q_{\text{下}}}{\mu}} \quad (4-50)$$

到此便建立了双向绿波的模型，为下文实现双向绿波带控制，实现双向绿波带的最优化提供了模型。

双向绿波带控制的时距图如图4-9所示：

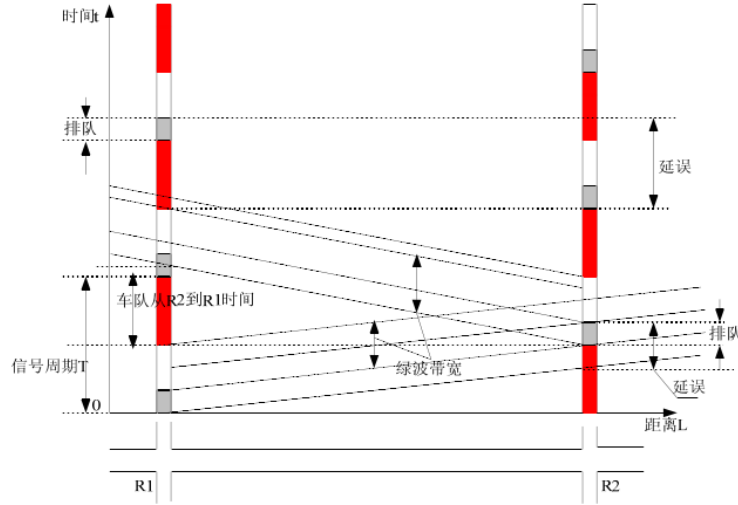


图 4-9 双向绿波带控制时距图

由图4-9可以知道，排队长度在绿波带中占据很大一部分，也就是说消耗了部分绿波带，同时由于不同相位差以及绿信比也对双向的绿波带有很大影响。延误、排队长度和停车次数就决定了干线上绿波的形成。

4.3.3 优化目标的建立

一般来说，对一系统控制的难点是控制系统的模型的建立。同样对于多目标优化来说，难点也是在优化目标的模型的建立。本小节就是建立我们要控制优化的双向绿波模型，因为我们要达到双向绿波的控制目的，就是要让干线的双向车辆的延时最小同时要保证双向的排队长度和停车次数达到最小，这样就可以使车辆在干线行驶的时候，能够以绿波带的形式向前行驶，而不会中间多次出现停车，同时车辆的延误也是最小。在此以第四章讨论建立的的双向延时模型和排队长度以及停车率为优化目标。

在前面建立的延误模型中，有目标函数(4-17)和目标函数(4-29)为：

$$D_{\text{下}} = \beta d_{\text{下}} + (1 - \beta) d'_{\text{下}} \quad (4-17)$$

$$D_{\text{上}} = \alpha d_{\text{上}} + (1 - \alpha) d'_{\text{上}} \quad (4-29)$$

其中 $d_{\text{上}}$ ， $d'_{\text{上}}$ ， $d_{\text{下}}$ ， $d'_{\text{下}}$ 如前所述，分别为如下（1），（2），（3），（4）式：

$$(1) \quad d_{\text{上}} = \frac{q_{\text{上}} \mu \left\{ \varphi_{12} - \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod(T) \right\}^2}{2(\mu - q_{\text{上}})}$$

$$(2) \quad d'_{\text{上}} = q_{\text{上}} t_R \left\{ \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod(T) - \varphi_{12} \right\} - \frac{1}{2} q_{\text{上}} \left\{ \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod(T) - \varphi_{12} \right\}^2 + \frac{1}{2} q_{\text{上}}^2 \frac{\left\{ \left[\frac{L}{v_{12}} \right] \bmod(T) - \varphi_{12} \right\}^2}{\mu}$$

$$(3) \quad d_{\downarrow} = \frac{1}{2} \tau_{\downarrow} q_{\downarrow} (\tau_{\downarrow} + t_{\downarrow}) = \frac{q_{\downarrow} \mu \left\{ T - \phi_{12} - \left\lfloor \frac{L}{v_{21}} \right\rfloor \bmod (T) \right\}^2}{1(\mu - q_{\downarrow})}$$

$$(4) \quad d'_{\downarrow} = q_{\downarrow} t_R \left\{ \left\lfloor \frac{L}{v_{21}} \right\rfloor \bmod (T) - T + \phi_{12} \right\} - \frac{1}{2} q_{\downarrow} \left\{ \left\lfloor \frac{L}{v_{21}} \right\rfloor \bmod (T) - T + \phi_{12} \right\}^2 + \frac{1}{2} \frac{q_{\downarrow}^2 \left\{ \left\lfloor \frac{L}{v_{21}} \right\rfloor \bmod (T) - T + \phi_{12} \right\}^2}{\mu}$$

其中 α 、 β 为自定义系数，且

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{上行方向的车队头部受到阻碍} \\ 0, & \text{上行方向的车队尾部受到阻碍} \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{下行方向的车队头部受到阻碍} \\ 0, & \text{下行方向的车队尾部受到阻碍} \end{cases}$$

此外建立排队长度的目标函数(4-51)和目标函数(4-52)如下：

$$Q_{\uparrow} = Q_{\uparrow 0} + Q_r \quad (4-51)$$

$$Q_{\downarrow} = Q_{\downarrow 0} + Q_r' \quad (4-52)$$

根据绿波带控制排队模型(4-34) (4-37)对公式进行化简有目标函数(4-53)和(4-54)：

$$h_{\uparrow} = \frac{1 - \frac{t_G}{T}}{1 - \frac{q_{\uparrow}}{\mu}} \quad (4-53)$$

$$h_{\downarrow} = \frac{1 - \frac{t_G}{T}}{1 - \frac{q_{\downarrow}}{\mu}} \quad (4-54)$$

综上所述，本文研究的优化目标可表示为：

$$\min y = f = [D_{\uparrow}, D_{\downarrow}, Q_{\uparrow}, Q_{\downarrow}, h_{\uparrow}, h_{\downarrow}]$$

s.t

$$\begin{aligned} 0 &\leq \phi_{12} \leq T \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda_{\uparrow} \leq \lambda_{\max} \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda_{\downarrow} \leq \lambda_{\max} \end{aligned}$$

4.3.4 目标函数的粒子群优化

对于以往的求解干线的交通这种多目标的问题时，通常会通过加权求和转换为单目标求解，但是这种求解得到的只是整个干线的控制效果相对较好，不会达到双向绿波的目的。

要想得到双向绿波的优化，就要对干线中双向的车辆延误、排队长度和停车率数进行优化，也就是对 $D_{上}$ 、 $D_{下}$ 、 $Q_{上}$ 、 $Q_{下}$ 、 $h_{上}$ 和 $h_{下}$ 六个目标函数进行寻优，以保证两个延误最小、两个排队长度和停车次率最小达到最优的双向绿波性能。而不是在一般的干线协调交通控制考虑整个延误总和最小，把它们转化为一个单目标来优化，因为这样优化可能使一方的延误达到较小，但是对于另一方来说却是不能达到较小的目的，同样对排队长度也是考虑双向的，同时考虑停车次率的优化，即实际是对五个目标进行优化。

粒子群优化算法具有算法的结构相对简单，同时粒子群优化算法也有很高的算法效率，可以很快找到优化目标的Pareto解集，则有其算法的流程描述为图示，在此令 $X_i = [\phi_{12i}, \lambda_{上i}, \lambda_{下i}]$ 为 $\min y = f = [D_{上}, D_{下}, Q_{上}, Q_{下}, h_{上}, h_{下}]$ 的一个解，在此令 $f1=D_{上}$ ， $f2=D_{下}$ ， $f3=Q_{上}$ ， $f4=Q_{下}$ ， $f5=h_{上}$ ， $f6=h_{下}$ 。则由向量 X_i ，其中 $i=1, 2\cdots, m$ 。构成的解集集合 $N=\{X_i\}$ 为粒子群算法中的粒子群。

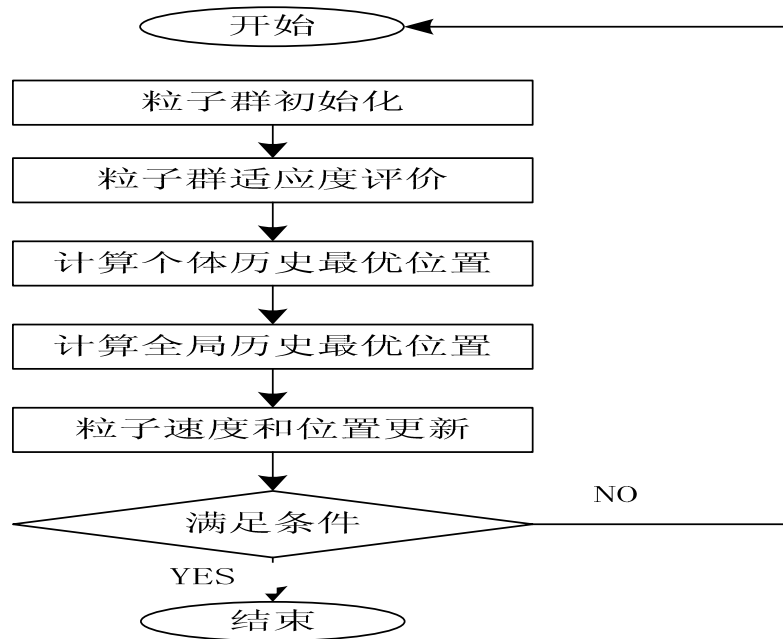


图 4-10 粒子群算法流程

则基本求解流程为：

(1) 初始化种群：设定种群的规模 m ，并随机产生粒子的位置 X_i 和粒子速度 V_i 。

(2) 利用目标函数 $D_{\text{上}}$ 、 $D_{\text{下}}$ 、 $Q_{\text{上}}$ 、 $Q_{\text{下}}$ 、 $h_{\text{上}}$ 、 $h_{\text{下}}$ 计算出 m 个粒子的适应度值：

```
for (i = 0, i < m; i++)  
    fitness1[i] = f1( $X_i$ );  
    fitness2[i] = f2( $X_i$ );  
    fitness3[i] = f3( $X_i$ );  
    fitness4[i] = f4( $X_i$ );  
    fitness5[i] = f5( $X_i$ );  
    fitness6[i] = f6( $X_i$ );
```

(3) 求出每个粒子下所对应的目标函数的极小值时的解：

```
for (i = 0, i < m; i++)  
    pBEST[1,i]: f1( $X_i$ );  
    pBEST[2,i]: f2( $X_i$ );  
    pBEST[3,i]: f3( $X_i$ );  
    pBEST[4,i]: f4( $X_i$ );  
    pBEST[5,i]: f5( $X_i$ );  
    pBEST[6,i]: f6( $X_i$ );
```

(4) 求出粒子群对应的每个目标函数的全局极小值时的解：

```
gBEST[1]: f1( $X_i$ );  
gBEST[2]: f2( $X_i$ );  
gBEST[3]: f3( $X_i$ );  
gBEST[4]: f4( $X_i$ );  
gBEST[5]: f5( $X_i$ );  
gBEST[6]: f6( $X_i$ );
```

(5) 求出目标函数全局最优时解的均值：

$gBest = \text{average}(gBest[1], gBest[2], gBest[3], gBest[4], gBest[5], gBest[6]);$

(6) 求出目标函数对应每个粒子极值时的解的均值：

$pBest[i] = \text{average}(pBest[1,i], pBest[2,i], pBest[3,i], pBest[4,i], pBest[5,i], pBest[6,i]);$

(7) 用 (5) 和 (6) 所得的 $gBest$ 和 $pBest[i]$ 来更新粒子群中每个粒子的速度和位置。

(8) 判断是否达到要求，此处设条件为不能再使所建立双向的延时、排队长度、停车率等目标函数更小了或者是否达到最大迭代次数了，若是，则结束输出所求解，否则转向 (2) 继续求解。

在本算法中，在选择惯性系数 w 时，很多文献中实验都表明， w 随算法的迭代线性减小时，对算法的收敛性是有很提高的，一般取其值在0.4到0.9之间最好^[27]。每一次迭代求解时 w 可依据式(4-52)进行计算，其中， N 为算法的迭代次数， N_{\max} 为算法要求的最大迭代次数，本文取 $w_{\max}=0.85$ ， $w_{\min}=0.45$ 。

$$w = w_{\max} - \frac{N(w_{\max} - w_{\min})}{N_{\max}}$$

对于粒子群算法中的，更新速度也是有一定范围的，对于每一维速度 v_d 都处于 $[-v_{d\max}, +v_{d\max}]$ 之间，通常为了防止粒子飞离最优解，把 $v_{d\max}$ 定义为每一维粒子的最大取值。

由此算法可以得到最优解集，以此得到的干线双向交通也将是最优的绿波带，保持在此最优的双向绿波情况下干线有最顺畅的交通状况。

4.4 小结

本章首先给出多目标优化的定义和概念，对粒子群优化算法（PSO）进行了详细的介绍。依据交通控制的基本原理和基本数学依据推导建立绿波带控制的数学模型，给出了干线交通双向平均延时、排队长度和停车率等模型，并且给出了单向的时距图和双向的时距图，形象地表示出干线上绿波形成的影响因素。最后建立了绿波带控制的控制优化多目标函数，采用粒子群算法对优化目标函数进行优化推导，给出粒子群优化算法的流程。

5 交通信息的获取及其绿波带反馈控制

交通道路的结构是很复杂的，但是总的归结起来只有两种：立体式、平面式两种。此两种结构各有特点，对于立体式的道路结构，如立交桥，具有交通效率高，可以节约车辆的交通时间，但是此种结构的建造代价高，维修也是消耗很多的财力人力的；而对于平面式的道路结构，虽然此种结构的道路建造代价低，但是此种交通效率和立体式相比就相对效率低了很多，此时就要对平面道路交通很好地配时设计。在本文中主要以平面式道路交通结构为背景，介绍交通流量交通信息检测器的在干线中的布局，讨论不同路段状况对交通信息检测器布局的影响。

交通信息检测器随着现代电子技术和计算机技术有了飞速的发展，并且检测器的采集效率也有了很大的提高，在现代交通控制中起着非常重要的作用，实时交通信息的可靠性和采集精度是决定着交通控制的信号配时成败的主要因素之一。

5.1 常用交通信息检测器

交通信息检测器技术可以概括为移动式 and 固定式检测两大类^[34]。

5.1.1 移动式交通信息获取

移动式交通信息获取技术是指运用装有特定设备的移动车辆检测道路上的固定标识物来采集交通数据的方法总和。目前主要有基于定位技术的动态交通数据采集技术、基于电子标签的动态交通数据采集技术、基于汽车牌照自动判别的动态交通数据采集技术和基于手动探测车的交通信息采集技术^{[35][36][37]}。

表 5-1 几种主要的移动式交通信息检测器技术特点比较

技术	优点	缺点	可检测参数
基于 GPS 定位的动态交通信息采集技术	数据检测连续性强；全天候条件下工作	需要足够多装有 GPS 的车辆运行在城市路网中；检测数据通信容易受到电磁干扰；在城市中的检测精度与 GPS 的定位精度有很大关系	直接：交通流量、瞬时车速 间接：行程时间、行程车速； 可实现多车道覆盖
基于电子标签的动态交通信息采集技术	数据检测连续性强；全天候条件下工作；可以提供自动收费功能	车辆必须安装有电子标签；必须有足够的车辆安装有电子标签；必须有良好的绿波算法，消除个别车辆运行故障引发的数据误差	直接：交通流量； 间接：行程时间、行程车速； 可实现多车道覆盖
基于汽车牌照自动判别的动态交通信息采集技术	数据检测连续性强；全天候条件下工作；车辆不需安装其他设备；可以检测路网所有车辆信息	检测精度受天气和光源影响较大；检测精度受汽车牌照的清晰度影响	直接：交通流量； 间接：行程时间、行程车速； 可实现多车道覆盖

基于手动探测车的交通信息采集技术	可提供街道、高速公路等整个路网的交通信息；不需要安装高成本的车载设备；可直接获得速度、行驶方向及行程时间等信息；克服了固定检测器只能检测固定位置交通信息的缺点	有时会发生丢包现象；实际速率比理论值偏低；存在转接时延	整个路网（包括高速公路、快速路、城市干道等）的车辆位置、速度、行程时间、行驶方向、交通事件信息
------------------	---------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------	-------------------------------------------------

5.1.2 固定式交通信息获取

固定式交通信息获取技术主要是指运用安装在固定地点的交通信息检测器设备对移动的车辆进行检测，从而实现采集交通信息的方法的总称。固定式交通信息检测器绝大部分安装在高速公路、快速路以及城市主干道和次干路的重要交叉口处。按检测器的工作方式及工作时的电磁波波长范围，可将检测器划分为磁频、波频和视频三大类交通信息检测器^{[35][36][37]}。

表5-2 几种主要的固定式交通信息检测器技术特点比较

技术		优点	缺点	可检测参数
磁频交通信息检测器	感应线圈检测器	技术成熟，易于掌握； 可测参数较多，灵敏度可调， 检测精度高； 使用适应性较大，安装简单， 成本低	使用效果及寿命受路面质量影响大； 环境变化及路面老化影响其工作； 修理或安装需中断交通； 易被重型车辆、路面修理等损坏	直接：交通流量、占有率； 间接：车速、车队长度、车身长度
	地磁检测器	容易安装，不易破坏，价格便宜； 能检测摩托车和自行车	不能检测慢速车； 材料容易老化，灵敏度逐年递减； 可能会漏侧紧跟的车辆	直接：交通流量、占有率； 间接：车速
	摩擦电检测器	响应快，恢复时间短，可精确测量轴数； 与环形线圈一起使用可测量车型、车速和车距等	受环境影响大	直接：交通流量； 间接：车速、车距、车型
波频交通信息检测器	微波检测器	恶劣气候下性能出色； 可以侧向方式检测多车道； 可检测静止的车辆	检测器安装精度要求较高； 道路具有铁质的分隔带时，检测精度下降	直接：交通流量、占有率、车速、多车道覆盖； 间接：车队长度、车头时距
	超声波检测器	体积小，安装方便； 使用寿命较长，可移动，无	检测精度不高，检测距离短；检测精	直接：交通流量、占有率；

		须破坏路面	度受环境影响较大； 检测范围呈锥形， 受车型、车高变化的影响	间接：车速、车队长度
	红外线检测器	可以侧向方式检测多车道； 可检测静止的车辆	性能受车辆本身热源影响； 性能随环境温度和气流影响降低； 抗噪声的能力弱	直接：交通流量、占有率、车速、多车道覆盖、车型、静止车辆； 间接：车队长度
视频检测技术		可为事故管理提供可视图像； 可提供大量交通管理信息； 单台摄像机和处理器可检测多车道	检测精度受测量区域背景和车速的影响； 大型车辆能遮挡随行的小型车，阴影、积水放射或昼夜转换可造成检测失误； 图像处理计算量大，实时性差	直接：交通流量、占有率、车速、车队长度、多车道覆盖、车头时距、车型；

5.1.3 基础交通信息采集

实时交通信息是指能表征城市道路实时交通状态的相关信息，如交通流三参数(流量、速度、密度)实时信息、交通事故信息、天气信息、实时交通管理控制信息、车辆和出行者需求服务信息等。交通流量、速度和密度是描述交通状态的最基本交通信息，三类信息的采集技术各有异同^[34]。

(1) 交通流量采集技术

交通流量的采集是在确定地点、确定时间段内，对通行车辆数量的数据采集，采集方法分为非自动采集和自动采集两种。

非自动采集方法有人工观测法、试验车移动调查法和摄影法。人工观测法是在选定地点及时间，由观测人员观测和记录通过实测断面的车辆数，此方法简单易行，不需要复杂设备，但需要较多的人力；试验车移动调查法是通过在测定区间内驾车反复行驶测量求得区间内断面平均交通流量的方法；摄影法是在选定断面处的路面上作标记后，对其作定时摄影，然后对照片进行处理可得出交通流量，此方法成本高，资料处理量大。

交通流量的自动采集技术已经有了很大发展。目前实用的采集技术有感应线圈检测器、超声波检测器、磁性检测器、红外线检测器、微波检测器。视频图像处理技术也正应用于交通流量的检测。

(2) 交通速度采集技术

交通速度按照行驶距离和所需时间的取值不同，可定义不通车速，包括地点车速、行

驶车速、运动车速、行程车速、临界车速和设计车速。由于平均数常常是表示数据集中特性的数值，所以车速也常常用平均值表示，如时间平均车速、区间平均车速等。

交通速度的非自动采集方法包括画线量测法、雷达测速法、光电管法、摄影法、车辆牌照识别法、浮动车法、跟车法等方法。其中，画线量测法、雷达测速法、光电管法、摄影法适用于进行地点车速的测量，而车辆牌照识别法、浮动车法、跟车法等适用于行程车速、区间平均车速的调查。这些人工测量方法均适用于短时期内的调查，不能满足实时性。

交通速度的自动采集技术主要包括感应线圈检测器、磁力检测器、红外线检测器、微波雷达检测器、超声波检测器、声学检测器和视频检测器等。

(3) 交通密度采集技术

交通密度是表征道路上车辆集中程度的一个交通参数，指某一时间在单位长度内（一个车道或全部车道）的车辆数。在很多情况下，不同路段的交通流量相同，而其交通密度却不大一样，其拥挤与否或拥挤程度的大小也差别很大，所以除交通流量、交通速度外，必须得到交通流密度才能反映出真实的交通状态。交通流密度通常用空间占有率和时间占有率来描述。

占有率数据的自动检测主要包括感应线圈检测器、磁力检测器、红外线检测器、微波雷达检测器、声学检测器和视频检测器。

5.2 交通干线交叉口分类及导流

由于本文只考虑平面交通控制的形式，为了保证交叉口处运行的车辆畅、安全地通行，因此就需要合理对城市交通中设计不同的交叉口，同时也对这些交叉口进行导流设计。一般情况下有T型交叉口、十字交叉口、Y型交叉口、多路交叉口、环型交叉口。同时不同的交叉口类型对交通流量交通信息检测器的布局也有很大的影响，下面就分别对这些交叉口及导流情况进行简要介绍。

对于T型交叉口，一般情况下也称为三路交叉口，此种交叉口多见于主干线的支路上，以及城市中的小区出口处，这种T型交叉口设计主要是为了保证主干线车辆进入小区，或者走捷径进入另外的主干线上，以保证节约行驶时间，这种交叉口的形状如图5-1所示。

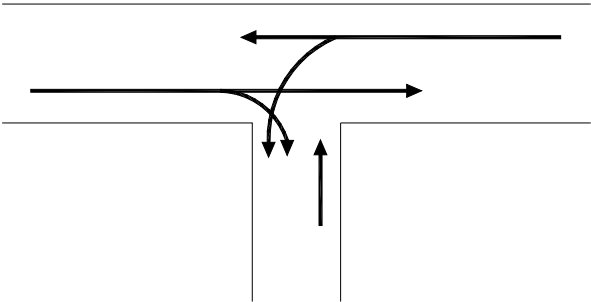


图 5-1 T 型交叉口

当为了保证车辆的行驶无冲突时，可以对此种进行导流化设计，以使交通的运行安全、车辆不会停车，一般情况下导流设计如图5-2所示：

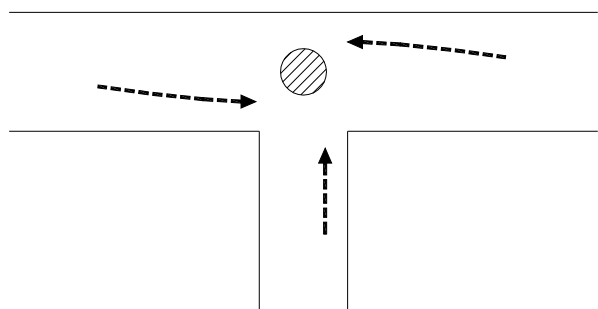


图 5-2 导流化处理的 T 型交叉口

对于十字交叉口，一般情况下都是在主干线，或者两天主干线相交处，此时相对于 T 型交叉口而言是比较复杂的，需要设置人行横道，对交通的信号的有效控制是非常重要的，一般情况下此种交叉口如图5-3所示。

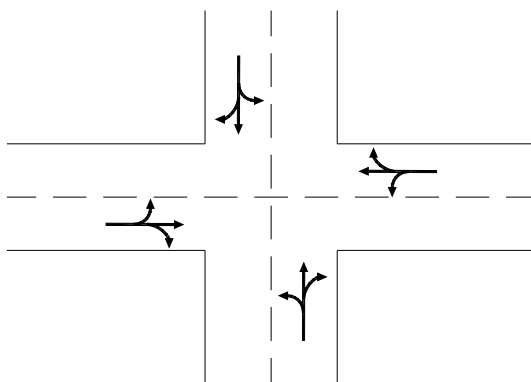


图 5-3 十字交叉口

此种情况下，加导流后的对交通车辆运行效果不是很明显的，一般情况下是不加导流化处理的。

对于Y型交叉口，此种交叉口多见于城市中的小区与小区交汇处，此种交叉口是比较复杂的，对交通的运行也是很很不安全的，影响交通的效率。如图5-4所示的此种交叉口。

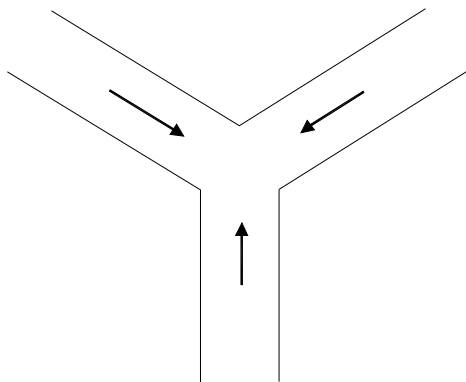


图 5-4 Y 型交叉口

此种情况下，为了保证交通的安全和运行效率，可以设置导流岛以进行导流化处理，可以明显降低交通事故，使交通的运行安全、高效。一般设计如图5-5所示的导流情况。

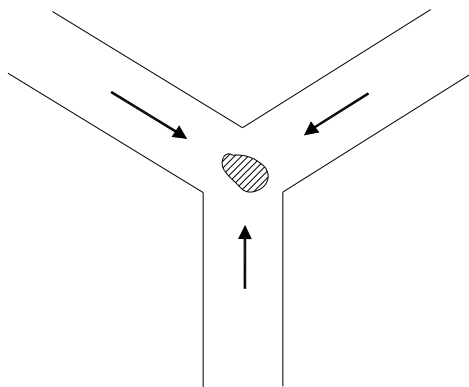


图 5-5 导流化处理的 Y 型交叉口

多路交叉口一般情况下出现在大的商业中心处，有很多路都相交于此，如图5-6所示，此时的人流和车辆量都是很大的。交通的状况也是很拥堵的，此时只有设计好交通信号的相位分时才行，通常此处也会有交通指挥人员来进行交通导流。

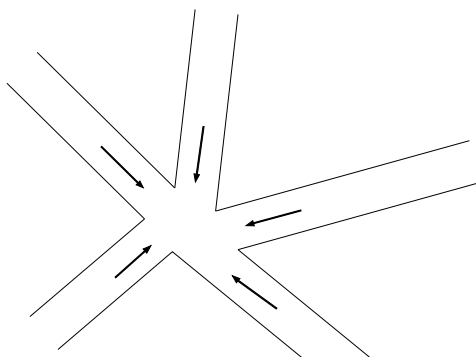


图 5-6 多路交叉口

此种情况下的交叉口，一般设定导流岛是最好的，如图5-7所示的导流化设置，导流岛处理后的交通安全性和交通的运行效率可以得到很大程度提高。所以一般情况下，在商业中心处有多条道路交汇的地方，都会设置导流到来增加交通运行安全性。

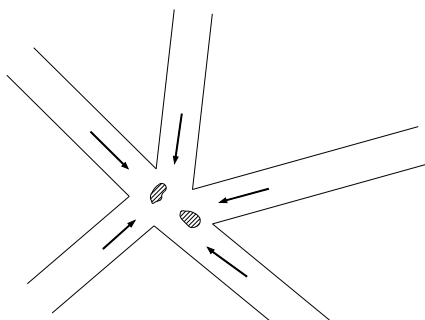


图 5-7 导流化处理的多路交叉口

环型交叉口一般情况下也是多见于商业中心处，多条道路交汇的地方，或者是多条干线相交处，此种交叉口如图5-8所示。一般情况下这种环型交叉口都是有导流岛的，这样可以确保交通的更安全性，同时也确保道路交通有更高的运行效率。

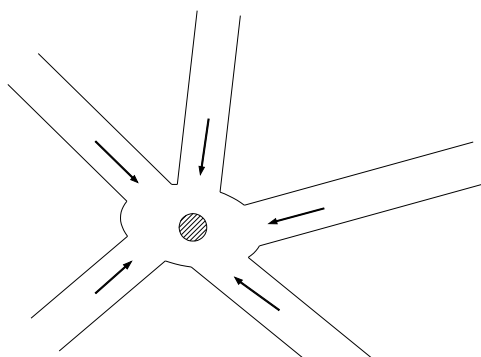


图 5-8 环形交叉口

5.3 交通信息检测器布局研究

5.3.1 交通信息检测器布设影响因素分析

在工程应用中进行交叉口交通信息检测器设置时,应根据城市交通及交叉口地理位置的具体情况进行具体分析,尽可能使检测器数据快速、准确、真实地反映实际交通状况。由于道路交通情况的复杂性和多样性以及城市路网地理条件的差异性,难以对实际情况一一分析,以下将针对交叉口交通信息检测器设置中的典型影响因素进行具体分析^[43]:

1、支路汇入车流

有些路段中存在无信号控制交叉口,一些从支路上来的车辆随机地汇入该路段,这种情况在安排检测器位置时也应给予考虑,即把检测器设在支路汇入点的下游。但是也应当指出,并非所有的中间支路都要给予考虑,只有车流流量比较大,其日交通量占主路车流日交通总量的以上的支路才予以考虑。

2、对向车流

设置交叉口检测器时,要注意尽量避免对向车流通过检测器的可能性。以避免造成数据的不准确。这种情况多数发生在公共汽车停靠站附近或对向车道上有停放的车辆,迫使对向车流驶入另一侧车道。遇到这种情况时,应尽可能把交通信息检测器位置向上游或下游移动,避开有可能发生对向车流误驶的地段。实在避不开的,考虑选用定向检测器。

3、短时干扰

某些地段经常会有车辆滞留,因而造成对路上交通的短时干扰,甚至导致局部混乱。在设置交叉口检测器时,应尽量避免这样的复杂路段,例如建筑施工料场的出入口,经常有送货车辆出入的房屋门口等等。

4、公交站点

在交叉口公共汽车停靠站附近安排检测器时,应注意汽车可能的停车范围,尽可能不在这一范围内设置检测器。可以把检测器设在公共汽车站下游方向一定距离之外。这样,若站上有车停靠时,其它车辆绕过公共汽车后,仍能通过检测器。安装位置如图 5-9 所示:

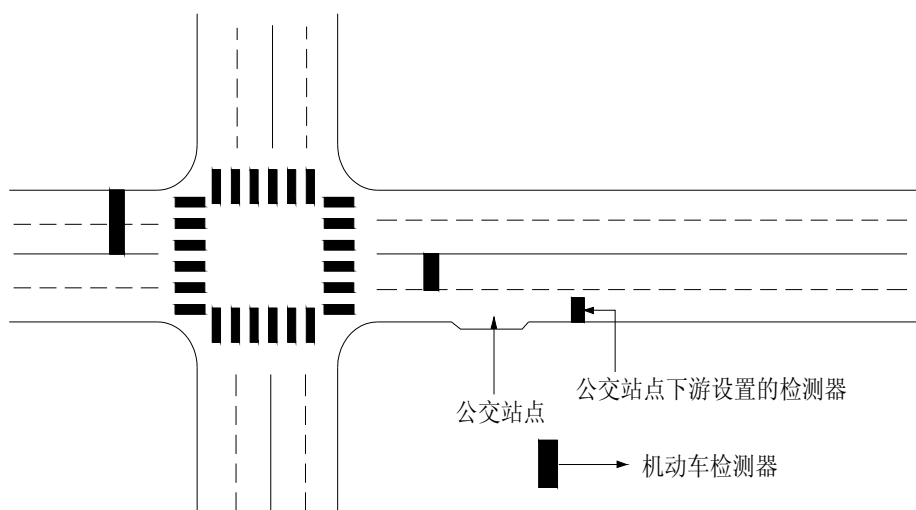


图 5-9 公交站点附近的检测器设置

5、左转车流

对于左转车流的检测有两种情况：一种是在远离停车线上游方向提前设置左转车道标识，左转车流在上游就和直行车分道行驶，检测器仍设在上游断面。另一种情况，左转车流只在停车线的渠化段才和直行车分流。称之为左转不完全车道，对于左转不完全车道在不完全车道入口设置检测器，并通过结合上游直左车道（直行车辆和左转车辆通行的车道）检测器获取左转车流的到达图式。

6、检测器的横向设置

在交叉口一般一条车道设置一组检测器，也可以采用具有多车道覆盖能力的检测器，同时对多车道进行交通参数的检测。

7、右转专用车道

如果进口道上有右转专用车道，且交叉口实行右转通行，即右转车辆遇到黄灯和红灯时，无需停车排队等待即可通过实行右转。需要在右转专用车道起始端设置检测器，以修正上游入口的检测器检测的交通量，且在计算延误和通车时，排除这部分车辆。

8、大型停车场出入口

城市停车场的出入口对道路交通影响较大，路段上的一些车辆驶入停车场，停车场的一些车辆汇入该路段，影响路段车辆的正常行驶。因此对于两个信号控制交叉口之间存在停车场，在检测器设置时必须对这种情况进行考虑，即在停车场的出口位置和入口位置设置检测器。但是，并不是所有的停车场出入口都需要设置检测器，只有当停车场的日出入交通量占该路段日交通量的以上时才给与考虑。

9、大型活动中心出入口

在大型活动开始和结束的一段时间范围内，大型活动中心附近的交通流量出现异常性波动，即路段的交通量急剧增加现象。对于频繁举办大型活动的活动中心，平均每周举办活动的次数超过次，活动举办期间路段交通流的增量高于正常条件下的交通流量的情况下，由必要对活动中心出口设置检测器。检测器的设置类似于大型停车场检测器设置。

5.3.2 交通信息检测器设置方法优化

次干路上的交通信息检测器的位置布设合适与否直接影响到车辆延误情况以及交叉口的服务水平，因此，有必要对检测器的位置设置进一步深入研究。检测器设置不仅要考虑到上节所提到的影响因素，而且其位置设置与配时参数也有直接的联系。在单位延长时间内检测器检测到的车辆必须能通过交叉口，若检测器设置的位置太远，会造成单位延长时间增长，为等待少数车辆而浪费绿灯时间，从而降低交叉口的通行能力，增加延误。在次干路上，初期绿灯时间的长短，也决定于检测器的位置，以及检测器到停止线之间可停放的车辆数。下面综合考虑检测器位置设置的相关因素，建立模型：

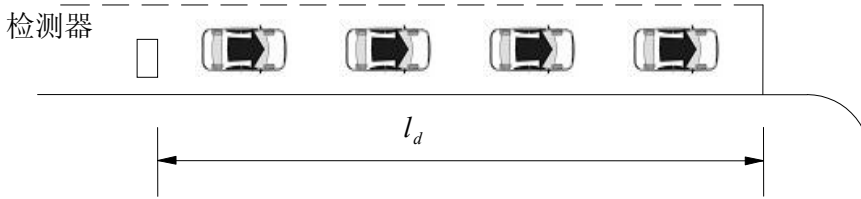


图 5-10 设定最小绿灯的固定值

如果停车线与感应线圈之间的距离 l_d 是固定的，在确定最小绿灯时间 $t_{\min,g}$ 时（见图 5-10）须考虑该距离的影响， $t_{\min,g}$ 应使排在停车线与感应线圈之间的车辆在此绿灯时间（平均排队时间 t_B ）内能够排空。可利用如下式子计算^[44]：

$$t_{\min,g} \geq \frac{l_d}{l_{Fz}} t_B \quad (5-1)$$

式中： $t_{\min,g}$ ——最小绿灯时间，一般为 6-10s；

l_d ——交通信息检测器到停止线的距离（m）；

l_{Fz} ——平均排队长度（m）；

t_B ——平均排队时间，即疏散时间(s)。

根据排队理论，次干道上在红灯和黄灯时间段内车辆排队情况可以近似看成符合 M/M/1 的排队系统。因此，可以根据排队理论，平均排队长度 l_{Fz} 可以按下式计算^[45]：

$$l_{Fz} = \frac{\rho^2}{1-\rho} \bar{l} \quad (5-2)$$

式中： l_{Fz} ——平均排队长度（m）；

\bar{l} ——排队车辆平均车头间距，一般可采用 6m；

ρ ——交能强度或利用系数；

$$\rho = \lambda / \mu \quad (5-3)$$

式中： λ ——车辆平均到达率（辆/s）；

μ ——平均服务率，即单位时间内离开的车辆数（辆/s）；

次干道在红灯和黄灯时间段内，车辆只有到达没有离去，因此绿灯刚开启时排队的车辆数最多为：

$$Q = \lambda t_r \quad (5-4)$$

式中： Q ——最大排队车辆数（辆）；

t_r ——单个车辆的最长延误时间，即次干道上红灯和黄灯时间之和（s）；

次干道绿灯开启后，排队车辆的队头以离去率 μ 疏散离去，而队尾以到达率 λ 向后延长，因此排队净疏散率为 $\mu - \lambda$ ，疏散时间为：

$$t_B = \frac{Q}{\mu - \lambda} = \frac{\lambda t_r}{\mu - \lambda} \quad (5-5)$$

因此，结合以上各式，可以得出交通信息检测器到停止线的距离 l_d 的关系式：

$$l_d \leq \frac{t_{\min,g} l_{Fz}}{t_B} = \frac{t_{\min,g} \frac{\rho^2}{1-\rho} \bar{l}}{\frac{\lambda t_r}{\mu - \lambda}} = \frac{t_{\min,g} \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \bar{l}}{\frac{\lambda t_r}{\mu - \lambda}} = \frac{\lambda t_{\min,g} \bar{l}}{\mu \cdot t_r} \quad (5-6)$$

基于排队理论，在保障检测器与停止线之间的车辆在最小绿灯时间内能够排空的基础上，可以由公式（5-6）求出 l_d 。次干路上交通信息检测器可以根据这个值进行设置。

5.4 无检测器交叉口交通信息的获取

就实际国内城市交通信息检测器的设置情况来看，由于成本和工作量的原因，各城市只有少部分交叉口和重点路段安装了检测器（其中有些检测器还存在受环境影响、或受外界破坏导致无法正常工作的问题），大部分交叉口及道路上还没有安装交通信息检测器。交叉口作为城市道路的咽喉部位，如何在无检测器的条件下获取其交通信息以实现交叉口交通流的有效控制和管理，就成为当前城市交通控制和管理研究中的一个现实问题。根

据无检测器交叉口交通流参数的不同获取机理,可分为以下两大类:邻近交叉口关联分析方法、移动+固定检测融合方法。由于移动+固定检测融合方法对检测器的分布位置要求较高,因此,在实际应用中常选用邻近交叉口关联分析方法或本交叉口时间序列方法^{[38][39]}。

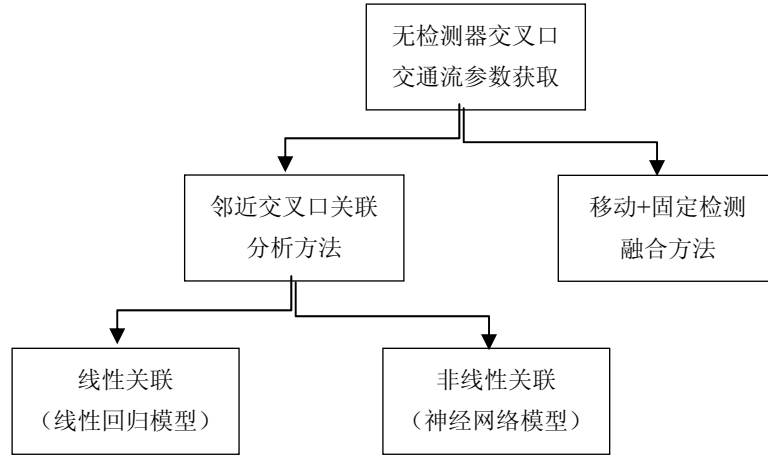


图5-11 无检测器交叉口交通流参数获取技术分类

5.4.1 邻近交叉口关联分析方法

所谓邻近交叉口关联分析方法,即在邻近有检测器交叉口交通信息的基础上,通过关联分析方法分析各有检测器交叉口与无检测器交叉口之间的关联程度,以关联程度较大的有检测器交叉口为对象,简历有检测器交叉口与无检测器交叉口交通流之间的关系模型,从而实现利用邻近交叉口检测信息来估计无检测器交叉口交通信息。

由于交叉口交通流之间可能存在线性、非线性两种关联关系,因此,邻近交叉口关联分析模型又可分为以线性回归为代表的线性关联分析模型和以神经网络为代表的非线性关联分析模型。

1. 线性关联分析模型

若某无检测器交叉口交通流参数 $\{y_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 受邻近多个有检测器交叉口交通流参数 x_1, x_2, \dots, x_m 的影响,且各因素与对象序列的关系 y_i 是线性的,则建立多元线性回归模型:

$$y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_m x_{im} + \mu_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5-7)$$

式中, x_{ij} 表示第 j 个变量的第 i 期实测值 ($j=1, 2, \dots, m$), μ_i 为模型的随即扰动项。

式子的矩阵形式为 $Y=X*B+\mu$, 其中:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix},$$

$$B = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_m)^T, \mu = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$$

用最小二乘法估计参数B，设实测值与模型估计值的残差为 $E=Y-\hat{Y}$ ，其中 $\hat{Y}=XB$ 。根据最小二乘法要求，有

$$E^T E = (Y - \hat{Y})^T (Y - \hat{Y}) = \min \quad (5-8)$$

即

$$E^T E = (Y - XB)^T (Y - XB) = \min$$

根据矩阵求导法则， $E^T E$ 对B求导，并令其等于零，则回归系数向量B的估计值为

$$\hat{B} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5-9)$$

将回归系数代入式（5-7）即可得到无检测器交叉口交通流参数计算模型，以邻近有检测器交叉口实时采集得到的交通流参数带入模型，就可以同步得到无检测器交叉口的交通流参数值。

这种回归分析方法的优势在于建模简单、实时性高，不足之处在于没有考虑交叉口之间关联关系的动态变化，模型缺乏适应交通流环境变化的更新机制。在实际应用时，需要定期对无检测器交叉口进行人工交通流调查，定期分析各交叉口之间的关联关系，并根据新的关联情况建立和更新相应的线性回归模型。

2. 邻近交叉口交通流神经网络模型

若某无检测器交叉口交通流参数 $\{y_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 受邻近多个有检测器交叉口交通流参数 x_1, x_2, \dots, x_m 的影响，且各因素与对象序列的关系 y_i 呈非线性，则可利用神经网络建立相应的非线性回归模型：

$$y_i = f_{NN}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) \quad (5-10)$$

此模型充分利用神经网络在非线性拟合方面的事，以有检测器交叉口交通流参数序列为输入样本，以无检测器交叉口人工调查到的交通流参数序列为输出样本；采用典型的三层网络结构，输入层神经元个数为m，输出层神经元层数为1；采用反向传播（BP）的学习算法。

5.4.2 移动+固定检测融合方法

我国各大中城市如北京、上海、广州、深圳、杭州等，已逐渐形成以GPS为基础的动态交通信息采集系统，这一采集系统是由覆盖整个城市范围的、装载有GPS终端的出租车、危险品运输车辆以及公交车、部分长途旅游包车构成^[40]。随着我国交通运输信息化水平的提高，这一庞大的移动采集系统将日趋完备，城市整体路网的动态交通流信息以统一格式标准实时传输至城市交通共用信息平台，可以实现同步下载基于GPS的移动检测信息。

国内城市的大部分交叉口都还没有安装任何固定检测器，并且固定检测器通常只能检测到路段点的交通流信息，检测信息完备性差；而移动检测技术能够实时检测到路网上较大范围内的交通流信息，但由于受到检测车辆随意停车因素的影响，导致检测精度不高。

移动+固定检测融合方法综合了两者的优势，通过融合流动于城市路网的大量移动检测信息与道路交叉口的固定检测信息（如感应线圈检测信息），来修正已有检测信息以及获取无检测器交叉口的交通流参数信息^[41]。

移动+固定检测融合模型主要包括移动检测模块、固定检测模块和数据融合模块三部分^[42]。其中，移动检测模块利用装有GPS模块的出租车、公交车等来采集车辆位置、速度信息，经推导可得到路段行程时间信息；固定检测模块利用埋设在道路上的感应线圈，采集交通流量、占有率，并可估计出车流密度等信息；数据融合模块主要是一个刻画输入与输出之间映射关系的神经网络模型，它以固定检测器邻近路段的移动检测交通流信息、交叉口的固定检测交通流信息为输入，以无检测器交叉口的交通流信息为输出，是一种新型的无检测器交叉口交通流参数获取技术。

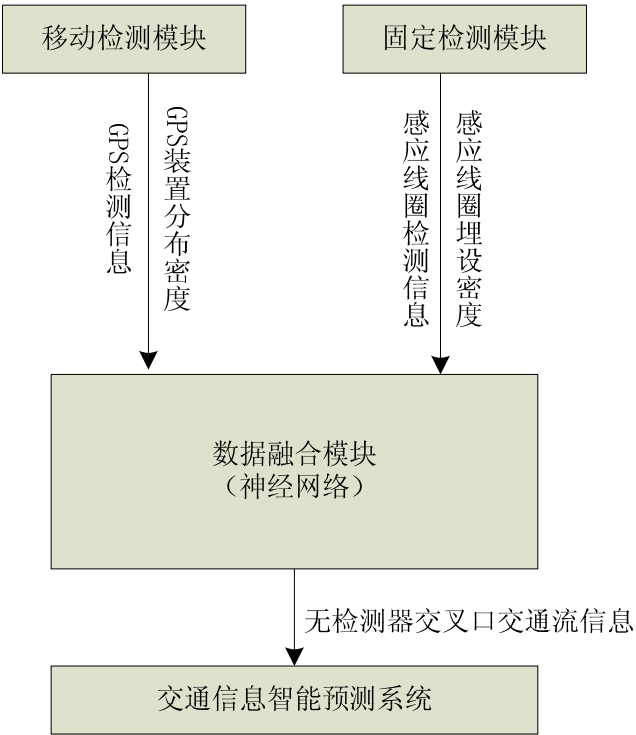


图 5-12 融合模型结构示意图

如图5-13所示的无检测器交叉口交通信息（以交通流量为例）获取问题，其中 C_0 为无检测器交叉口，交叉口 C_1 和 C_2 各进口道均安装有感应线圈，路段 d_i （ $i=1, 2, 3, 4$ ）上分别分布有 M_i 个移动检测器。

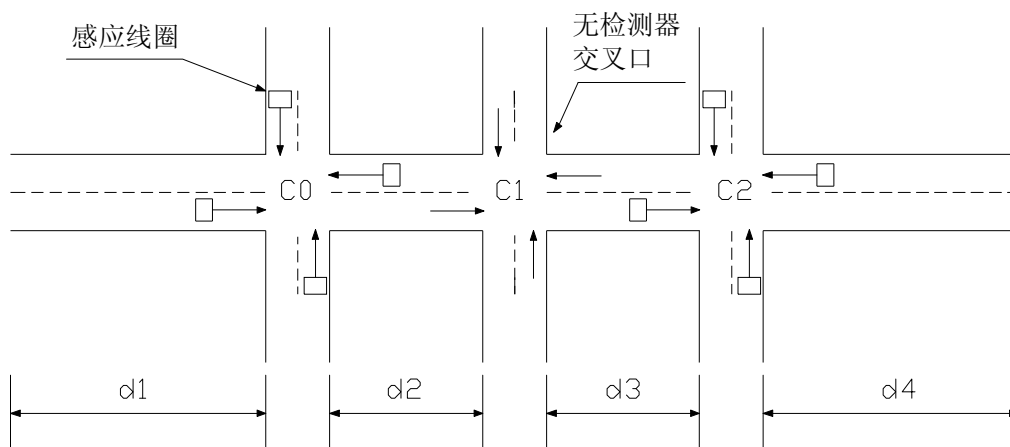


图 5-13 无检测器交叉口位置及固定检测器分布图

为得到无检测器交叉口 C_0 东西方向的交通流量，以交叉口 C_1 和 C_2 各进口道检测到的8个交通流量数据序列、路段 d_2 和 d_3 上移动检测到的行程时间序列，以及路段上的GPS分布密度 M_2/d_2 和 M_3/d_3 为输出样本，以无检测器交叉口人工调查到的交通流参数序列为输出样本；采用三层网络结构，输入层神经元个数为12，输出层神经元个数为1；采用反向传播的学习算法，从而实现对无检测器交叉口交通流参数的有效估计^[42]。

5.5 绿波带时差的反馈控制

在所谓程序选择控制上，控制图形的转换和随之带来的一些混乱现象基本上是不可避免的。而且所要准备的控制图形的数目和内容也成问题，除此之外，要它维持反馈的机能也是困难的。作为改善这种程序的反馈控制方式缺点的一个方法，可以采用时差反馈控制的方法。就是将每一周期的损失（延迟时间和停车次数的加权和）向每个周期减少的方向使时差逐渐移动的方法，即使马上不会成为最佳时差，但只要每当移动时差时，损失时间减少，就迟早会接近于最佳值^[48]。

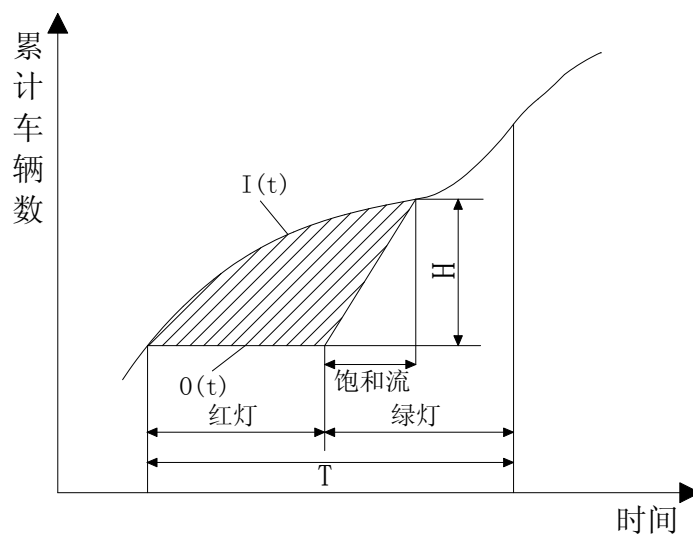


图5-14 一个流入口的延迟时间

首先，考虑关于时差移动量和损失时间的增减。如图5-14所示，表示一个流入口的交

通量。I(t) 表示到达交通，O(t) 表示出发交通。每个周期的延迟时间以 $\int_0^T [I(t) - O(t)] dt$

来表示。现在如假定： f_1 为红灯开始时的到达交通量， f_2 为饱和流重点的到达交通量， s 为饱和交通量， H 为在饱和流中流动的车数（或者每个周期的停车车数）， H' 为假定到达交通是与 f_1 同样的车流时，在饱和流中流动的车数（或停车次数）， h 为 $H - H'$ ， P 为时差的移动量，则时差向前进一侧移动而引起的延迟时间减少量（ A^- ）就能够表示如下式：

$$A^- = P \left(\frac{s - f_1}{s} \right) \left\{ n - \frac{1}{2} P \left(\frac{s - f_1}{s} \right) \left(\frac{s - f_1}{s - f_2} \right) (f_2 - f_1) \right\} \quad (5-11)$$

时差向延迟一侧移动而引起延迟时间的减少量（ $-A^-$ ）就能表示如下式（如图5-15）：

$$-A^- = P \left(\frac{s - f_1}{s} \right) \left\{ -h - \frac{1}{2} P \left(\frac{s - f_1}{s} \right) \left(\frac{s - f_1}{s - f_2} \right) (f_2 - f_1) \right\} \quad (5-12)$$

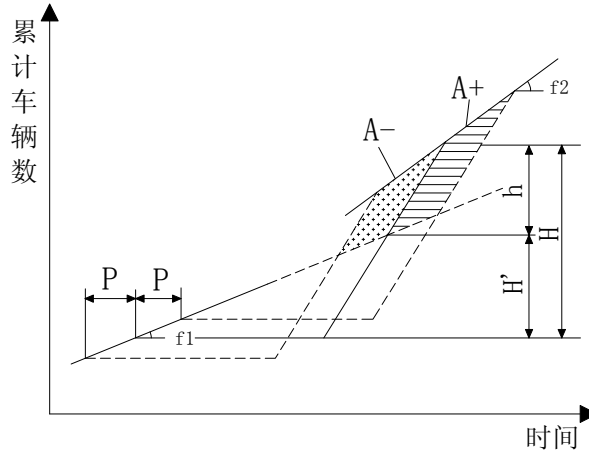


图5-15 移动时差使延迟时间减少

但是，到达交通为均匀流（ $f_1 = f_2$ ）时，延迟时间的增减为零。同样 $f_1 \neq f_2$ 时，由于时差移动而知增加如图的停车车数。即，由于向前进一侧和向延迟一侧时差移动而引起的停车车数减少可以分别表示为（如图5-16所示）：

$$P \frac{f_2 - f_1}{s - f_1} s, \quad P \frac{f_1 + f_2}{s - f_1} s \quad (5-13)$$

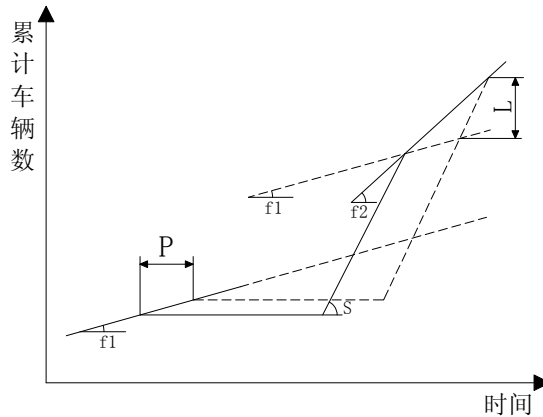


图5-16 移动时差使停车次数减少

f_1, f_2, H 可以通过交叉口入口的交通信息检测器直接测定,而且如把饱和流的继续时间假定为 t 时,则 s 及 H' 可以分别按 $s = H / t$ 、 $H' = sf_1 r / (s - f_1)$ 来计算。

因此,通过时差的移动能够计算延迟时间和停车次数的增减。在双向通行道路的情况下,求出对两方向的这些损失时间的增减,使其向损失时间减少的方向移动时差,这样可以有效提高绿波带的控制效率。

5.6 小结

本章首先对常用交通信息检测器和交通信息采集技术进行了介绍。在平面道路结构和道路交叉口的分类的基础上,对交通信息检测器布设影响因素进行了分析,并对其提出了设置优化方法;其次针对城市主干道交叉口未设置交通信息检测器的情况,对交叉口交通信息的获取方法进行了研究;最后还结合城市主干道上实时获取的交通流信息,对绿波带时差的反馈控制进行了研究。

6 仿真实例分析

6.1 调研准备

道路渠化和交通流量是交叉口控制方案的设计前提。本文以南京白下路沿线交叉口为例，进行了相关资料的调研和收集，为后续研究做准备。结合本文第四章所建模型，选取白下路沿线白下路—长白街、白下路—太平南路两个连续交叉口为研究对象。

白下路—长白街、白下路—太平南路交叉口均是典型的十字交叉口（图6-1），路口间隔约450米；白下路断面为一块板形式，通过设置隔离栅栏实现机非分离，慢行不共板，路幅宽约25米。

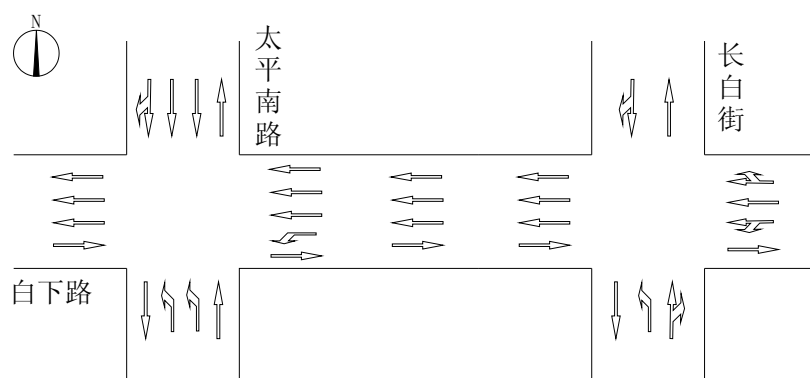


图6-1 白下路沿线交叉口示意图

6.2 现状分析

经过对现场交通现状的调研，发现在控制方案的设计中存在以下难点：

1. 交叉口支路方向车流量变化大，部分时段内车流量较大。当支路方向的转向车流进入干线时，将使得干线直行车队离散，导致控制方案达不到理想的控制效果。



图 6-2 白下路沿线

2. 在白下路—长白街交叉口东侧，设有一对非港湾式公交停靠站台。公交车的停靠对干线车流的稳定运行有一定影响。

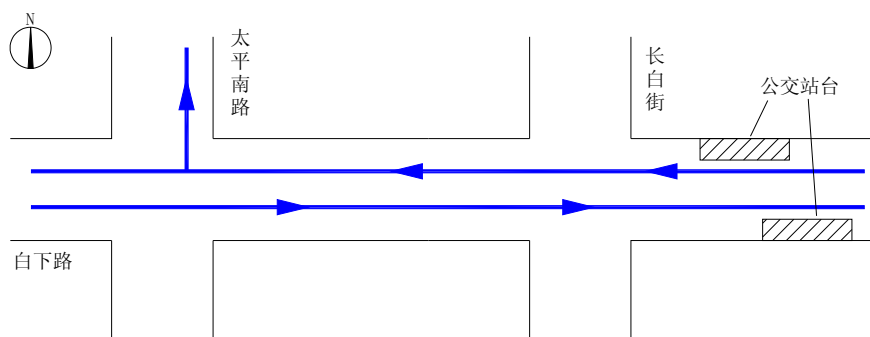


图 6-3 白下路沿线公交站台

3. 路段沿线分布有医院、银行、交管所等单位出入口，进出单位的车流、人流不受管制，对干线车流有较大影响。

4. 研究对象的上下游路段道路条件差异明显，白下路—长白街、白下路—太平南路交叉口的上下游路段宽窄不一。当路幅较宽行驶条件良好时，车队将以较快的速度行驶；当路幅较窄行驶条件不好时，车队将以较慢的速度行驶。

6.3 流量统计

为了得到道路上的实时交通流特性，需要调查道路上各个时段的交通量，对道路上交通流的早高峰、晚高峰和平峰时段的交通流特性进行分析。本文对白下路沿线路口的交通流量调查时间选定在2012年4月24日（周二）下午17：30～18:30，得到其平日晚高峰交通流量。

表 6-1 晚高峰交叉口流量（单位：pcu/h）

长白街—白下路	东进口	西进口	南进口	北进口
左转	485	0	331	0
直行	747	413	166	127
右转	216	0	115	359
太平南路—白下路	东进口	西进口	南进口	北进口
左转	492	0	378	0
直行	788	413	171	433
右转	0	0	0	167

6.4 现行交叉口绿波协同控制方案

白下路沿线各交叉口现实行无线电缆线控，信号机通过定时脱机的方式，实行白天（7:00～21:00）和夜间（21:00～7:00）两套控制方案。

白下路—长白街交叉口现行白天控制方案如图6-4所示：

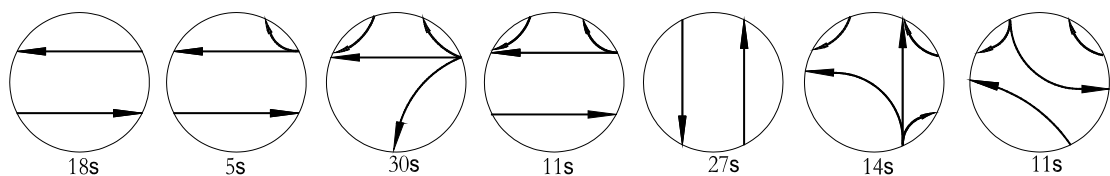


图 6-4 白下路—长白街控制方案

白下路—太平南路交叉口现行白天控制方案如图6-4所示：

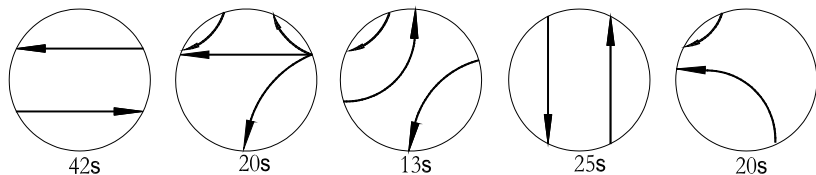


图 6-5 白下路—太平南路控制方案

白下路—长白街、白下路—太平南路交叉口现行绿波协同控制方案如下：

表 6-2 白下路—长白街、白下路—太平南路交叉口现行控制方案

交叉口	白下路—长白街	白下路—太平南路
周期	130s	130s
协调相位时间	53s	42s
相位差	60s	

6.5 实验结果及其分析

结合第四章中所建模型，考虑支路延误对干线协同控制方案进行优化。在周期 $T=130s$ 不变前提下，惯性系数 w 的取值范围： $w_{\max}=0.85$ ， $w_{\min}=0.45$ 。

表 6-3 白下路—长白街、白下路—太平南路交叉口优化控制方案

交叉口	白下路—长白街	白下路—太平南路
周期	130s	130s
协调相位时间	55s	55s
相位差	48s	
干线上行方向延误	119.6s	
干线上行方向平均延误	2.3s	
干线下行方向延误	111.1s	
干线下行方向平均延误	2.2s	
非干线方向延误	96.5s	
干线总延误	327.2s	
干线上行方向排队长度	3.5	
干线下行方向排队长度	4.6	
停车率	1.05	

将优化控制方案与原控制方案相比较，路口间的相位差由原60s调整为48s。调整后干线总延误为327.5s，非干线方向延误96.5s；其中干线上行方向与下行方向延误分别为119.6s和111.1s，干线上行方向与下行方向平均延误分别为2.3s和2.2s。优化方案的绿波

带宽变窄了，既保证减少了干线的总延误，使绿波带外的车辆能以较小的延误通过路口，也使支路的车辆以较小的延误通过路口。

采用粒子群算法的收敛速度如图6-6所示：

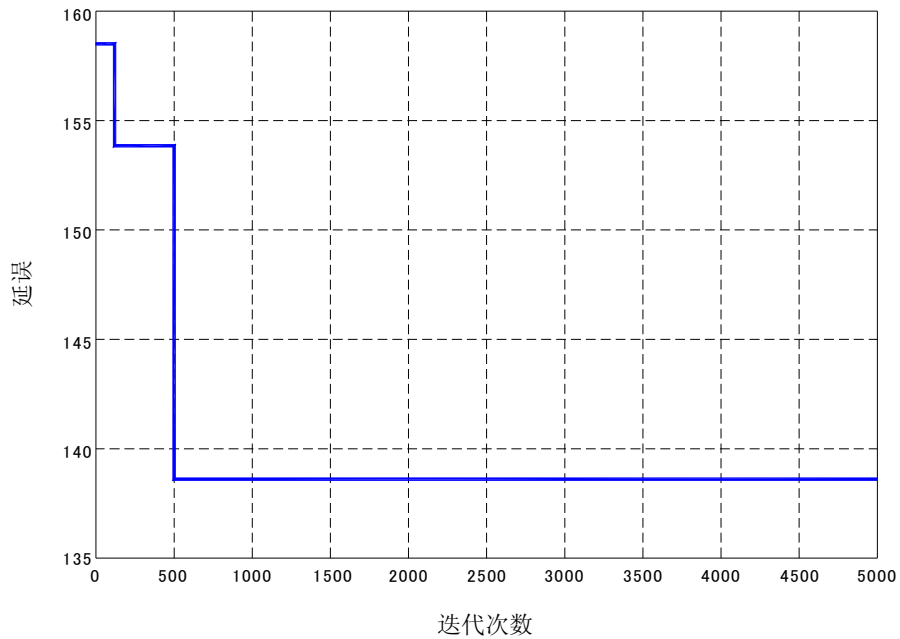


图 6-6 粒子群算法收敛速度

图6-7反映了采用粒子群算法的执行速度变化曲线，可以看出，迭代次数与算法的执行时间呈线性增长的关系。若考虑实时优化的需要，优化时间应不大于3s，此时迭代次数可达到13000次，此时算法已基本收敛，达到优化控制的目的。

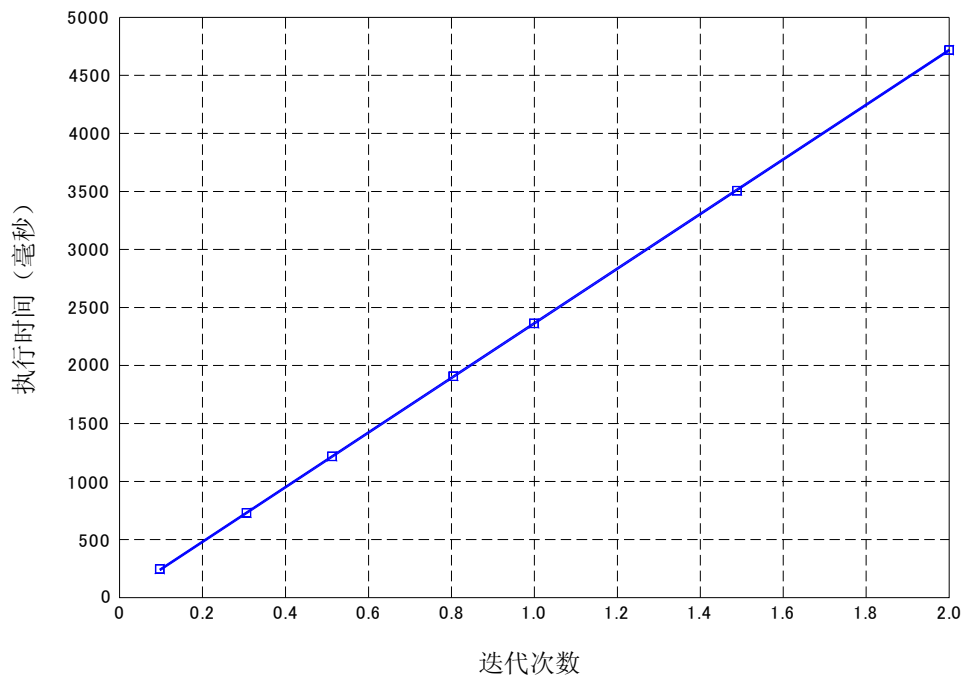


图 6-7 粒子群算法执行速度

6.6 小结

本章结合前文所建模型,通过南京市白下路沿线两个相邻路口的实例绿波控制优化方案的各项评价指标进行了分析,进一步验证了算法的有效性和可行性。

7 结论与展望

7.1 研究结论

城市主干道绿波控制适用性研究是一项涉及面广、内容复杂的研究课题,对于解决城市交通拥堵有着重要的实际意义。本文选取绿波带控制基本原理出发,对绿波带的控制优化进行了研究,研究成果和结论如下:

(1) 依据交通控制的基本原理和基本数学依据推导建立绿波带控制的数学模型,给出了干线交通双向平均延误、排队长度和停车率等模型,并且给出了单向的时距图和双向的时距图,形象地表示出干线上绿波形成的影响因素。相对于以往的单目标城市主干道控制方案,本文将单目标转换成多目标进行研究,建立了绿波带控制的控制优化多目标函数,采用粒子群算法对目标函数进行优化推导。

(2) 结合南京市白下路控制方案实例,通过绿波带控制的数学模型求得平均延误、排队长度和停车率等指标,最后根据粒子群算法求得了Pareto最优解集。实例结果证明优化后的控制参数可以有效减小延误,提高交通控制效率。

(3) 针对交叉口交通信息检测器设置中的典型影响因素进行具体分析,综合考虑检测器位置以及检测器到停车线之间可停放的车辆数等因素,建立了交通信息检测器设置方法优化模型。

7.2 研究展望

本文在较系统地总结研究绿波控制系统理论与方法的基础上,对绿波带优化控制进行研究,但是因研究对象的复杂性和作者能力有限,本文还存在诸多问题有待进一步研究:

(1) 本文的绿波带控制模型对现实的交通状况进行了一些假设和简化,使优化出来的控制方案能够更好地符合实际交通流特性。例如在国内的交通控制中,交通信号周期中包括红灯、绿灯、和黄灯,黄灯是为了清除某一相位的交通车辆而设立的,是不可缺少的。若考虑现实中各种实际因素,建立的模型更精确,但是建立模型却增加难度,对于此方面还需要进一步研究。

(2) 由于城市主干道交通的复杂性和多样性以及城市路网地理条件差异性,未对实际情况一一分析,本文中建立的交通信息检测器设置方法优化模型只考虑了检测器位置等典型因素,模型的精确性有待进一步研究。

(3) 无检测器交叉口交通信息的获取只提出了研究思路,相关理论方法有待进一步开展实证研究。

参考文献

- [1] 陆化普. 城市交通现代化管理.北京:人民交通出版社, 1998.
- [2] 王毅, 王昌井. 北京市城区道路交通噪声的分析与研究.噪声与振动控制, 1997, 17(4):2528.
- [3] 徐春秀. 中国大城市交通可持续发展研究—以北京市为例.城市问题, 1999, 18(5):38 — 41.
- [4] 北京市环境保护局. 2002 年北京市环境状况公报, 2003.6.1.
- [5] LittleJ.D.C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear Progranllning[J].Operations Research, 1996.
- [6] 曹洁, 苏玉萍, 等. 城市交通信号灯两级模糊控制及仿真研究[J].交通与计算机, 2007, 25(1):82~85.
- [7] 减利林, 贾磊, 等. 交通干线相邻交叉口动态协调控制研究[J].公路交通科技, 2007, 24(7):103~106.
- [8] MnDOT. MnDOT Traffic Signal timing and coordination manual[R]. Minnesota, 2004. [73] TxDOT. Traffic signal manual [R].Texas, 1999.
- [9] 裴玉龙, 孙明哲, 董向辉. 城市主干路交叉口信号协调控制系统设计研究[J].交通运输工程与信息学报, 2004, 2(2):4146.
- [10] H. Gene Hawkins, Jr. Paul J. Carlson. Traffic signal warrants: guidelines for conducting a traffic signal warrant analysis [R]. TxDOT, Texas, 1998.
- [11] Roger P.Roess,William R.Mcshane,and Elena S.Prassas.Traffic Engineering (Second Edition)[M].United States:Prentice Hall Upper Saddle River,New Jersey,1998.
- [12] 张智勇, 荣建, 任福田. 跟车模型研究综述[J]. 公路交通科技, 2004, 21 (8): 108~113.
- [13] 翟润平, 周彤梅编著. 道路交通控制原理及应用. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2002.
- [14] Nakatsuyama M, Nagahashi H, Nishizura N, Fuzzy Logic Phase Controller for Traffic Junctions in the One-way Ar-terial Road[A]. Proceedings of IFAC 9th Triennial World Congress[C], Budapest, Hungary, 1984: 2685~2870.
- [15] Pappis C P,Mamdani E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction. IEEE Transactions on Systems, Man,and Cyber—netics,1977,SMC-7(10): 707~717.
- [16] Lee J H, Lee K M, Lee-Kwang H. Traffic control of intersection group based on fuzzy logic . in Proc. 6thint. Fuzzy Systems Assoc World Congr[C], 1995: 465~468.
- [17] C. Jotin Khisty, B. Kent LaU. Second Editon. Transportation Engineering. New Jersey: PRENTICE HALL, 1998.
- [18] P. R. Lowrie. The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System-Principles, Methodology, Algorithms. London, U. K. IEEE International Conference on Road Traffic Signaling, 1982.
- [19] 赵国永, 陈阳舟, 崔平远, 杨玉珍, 赵晓华. 中关村西区的单向交通干道协调控制. 交通与计算机, 2006.
- [20] 吕兵, 翟润平. 基于类排队长度的交通干道模糊控制方法研究. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2006.

- [21] 王俊刚. 交通信号线控模型研究: [北京工业大学博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- [22] 刘智勇, 吴今培, 李秀平等. 城市交通大系统递阶模糊神经网络控制. 信息与控制, 1997, 25(6): 441~447.
- [23] 常云涛, 彭国雄. 基于遗传算法的城市干道协调控制. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 106 • 112
- [24] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用 [M]. 科学出版社, 2009 年 3 月.
- [25] 熊盛武, 刘麟, 王琼, 史旻. 改进的多目标粒子群算法[J], 武汉大学学报(理学版), 第 51 卷第 3 期 2005 年 6 月.
- [26] 张利彪, 周春光, 马铭, 等. 基于粒子群算法求解多目标优化问题[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1286~1291.
- [27] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998, (5): 69~73.
- [28] Akcelik R, Routhail N. Overflow queues and delays with random and platoon arrivals at signalized intersections [J]. Journal of Advanced Transportation, 1994, 28 (3): 227~251.
- [29] 王慧文, 夏先翠. 干线交叉口信号协调控制下延误分析 [J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 第 19 卷第 4 期 2005 年 12 月.
- [30] 仇东华. 干线协调控制的研究与设计:(硕士学位论文), 合肥: 中国科学技术大学, 2009 年.
- [31] Chen Y L, Yang H H. Minimization of travel time and weighted number of stops in a traffic-light network [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144(3): 565~580.
- [32] Guojiang Shen. Urban Traffic Trunk Two-direction Green Wave Intelligent Control Strategy and Its Application. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21~23, 2006, Dalian, China.
- [33] Transportation Research Center. TRANSYS27F Use' s Manual [M]. University of Florida, 1998.
- [34] 姜桂艳. 道路交通状态判别技术与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [35] 林培群, 徐建闽, 傅惠, 梁俊斌. 多分支 BP 网络模型及其在车型分类中的应用[J]. 微计算机信息, 2005, 21 (12): 183~185.
- [36] 徐建闽, 梁俊斌. 基于感应线圈的骑线车辆检测方法[J]. 华南理工大学学报, 2007, 35 (7): 20~24.
- [37] 徐建闽, 傅惠. 基于动态时间的多模板匹配车型分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (3): 529~532.
- [38] 张赫, 杨兆升, 李贻武. 无检测器交叉口交通流量预测方法综合研究[J]. 公路交通科技, 2002, (1): 91~95.
- [39] 陈新全, 侯志祥, 吴义虎, 刘振闻. 无检测器交叉口交通流量预测的灰色神经网络模型[J]. 系统仿真学报, 2004, (12): 2655~2656.
- [40] 邹亮, 徐建闽. 基于浮动车移动检测与感应线圈融合技术的行程时间估计模型[J]. 公路交通科技, 2007, 24 (6): 114~117.
- [41] 邹亮. 基于移动与固定检测技术的动态交通诱导关键模型及算法研究[D]. 广州: 华南理工大学博士学位论文, 2006.
- [42] 蔡文龙, 张立国, 陈艳, 翁建华. 基于模糊神经网络的多传感器信息融合技术及应用[J]. 传感技术学报, 2003 (4): 501~503.

- [43] 赵强.基于关键交叉口交通状态判别的配时参数计算. [硕士学位论文] [D].吉林: 吉林大学.2007.
- [44] [德]道路与交通工程研究学会编;李克平译.交通信号控制指南—德国现行规范(RiLSA)[M].北京:中国建筑工业出版社.2006.
- [45] 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.9, 70~83.
- [46] 许伦辉, 傅惠. 交通信息智能预测理论与方法. 科学出版社, 2009.1, 12~22.
- [47] 徐吉万, 徐冬玲. 城市交通的计算机控制与管理. 测绘出版社, 1988.
- [48] 市原熏, 枝村俊朗著, 王惠普, 林耀中译. 道路设施工程学(安全、控制、公害防止). 人民交通出版社, 1982.

学号：3090413

作者：徐伯寅

指导教师：何宁 教授级高级工程师

专业：交通运输规划与管理

研究方向：城市与区域交通规划

城市主干道绿波带控制适用性研究

详细摘要

随着城市化进程的加快及机动车辆人均拥有率的增加,城市交通问题已成为影响社会进步的热点及难点问题。而城市主干道作为城市交通网络中车辆通行的大动脉,承担着车辆流通的重担。因此,在解决城市交通阻塞问题中,重中之重的是提高干线上车辆的通行能力,减少车辆的阻塞次数。由于地理资源和资金的限制,尚难以通过道路的大量投资建设,来满足城市交通发展的需要。因此,提高现有道路的通行能力成为解决城市道路设施负担过重的突破点。

国外的专家学者对干道协调控制优化研究的工作,主要基于绿波带宽度最大和基于延误最小两方面。早期,学者们通过理论分析,对定时式线控制系统采用时间—距离图进行交通信号协调控制的研究,通过采用较为直观的图解法和数解法确定线控制的重要参数绿时差。这种人工工作图或计算方法不仅十分繁杂,难免发生人为错误,而且协调效果不一定是最好的,更无法处理多相位等复杂配时方案的多个交叉口之间的协调。我国在干线控制方面的研究起步比较晚,国内的线控系统大多数是引进了外国的线控方法和技术。此外与发达国家比较,我国交通最大的一个特点是:机动车辆与非机动车辆以及行人在同一路面上混合在一起,交通流复杂。直到20世纪70年代国内才开始把电子信息和自动控制技术等应用在交通运输和交通管理领域中,最早开始进行交通信号控制研究和研发的是北京、上海以及广州等大型城市,然后在全国很多大城市推广使用线性协调交通信号控制系统和单点定周期交通信号控制器。

虽然这些交通信号控制系统在一定程度上缓解了交通拥挤的情况,但是我国受到机动车、非机动车混行等客观因素影响其技术能力相对比较落后,这使得从国外引进的一些先进的交通协调控制系统执行效率不高,大多数还在采用最基本的单点控制模式,只有在少数的城市和道路上实现协调控制的作用。

本文针对现代交通中干线协调控制的问题,对城市主干道双向绿波带控制优化进行了研究,主要工作如下:

(1) 讨论了双向绿波的概念和控制目标,依据对交通控制中的性能指标分析建立了双向绿波的模型,通过讨论多目标优化的基本概念和基本原理,对建立的双向绿波的模型分析,给出了延误和停车率等优化目标。然后利用粒子群优化算法(PSO)对建立的多目标的模型进行优化,给出优化设计的基本步骤的描述。

(2) 讨论在城市主干道中交通流量采集交通信息检测器的布局,针对不同的交通道路情况对交通信息检测器的合理布局进行讨论,以很好地采集干线的交通流量和采集精确

的交通信号参数,综合所讨论的因素给出了交通信息检测器布局的整体思路。

(3) 结合南京市白下路沿线两个相邻路口的实例,对绿波控制优化方案的各项评价指标进行了分析,验证了算法的有效性和可行性。

关键词: 绿波带, 粒子群算法, 交通信息检测器布局

Research of Applicability of Green-Wave in the main road

Abstract

With the acceleration of the process of urbanization and the increasing ownership of vehicles, the issue of transportation has become a thorny and difficult problem in urban. As the city traffic artery of traffic network, urban bone road take the great role in the traffic flow. To solve the urban traffic problem, the most importance is to improve the capacity of the skeleton route, to reduce the number of vehicles blocking. Owing to geography resources and the funds limit, to satisfy the needs of municipal transportation is hard to implementation just by big investing in traffic construction still. Therefore, improving the capacity of delivery vehicles about the existing traffic line become the breakthrough point of solves overburdened of the urban road facility.

On the basis of analyzing the problems of traffic signal coordinated of trunk, foreign experts and scholars make the study mainly based on the maximum green -wave bandwidth and minimum delay. The work diagram and the computational method is not only very multifarious and coordination effect is not obvious. The research of traffic signal coordinated of our country started late, the existing wire control system are introduced from the foreign control method and technology. In addition, compared with the developed country, the traffic flow of our country mixes the motor vehicle and non-motorized vehicle. Although the traffic signal control system alleviates traffic congestion, the current measures of traffic signal coordinated of trunk is not efficient, owing to the objective factors that motor vehicle and non-motorized vehicle are driving on the road at the same time. The majority of our cities are still using the most basic single point control mode, only in a minority of the cities realized the coordinated control function.

On the basis of analyzing the problems of traffic signal coordinated of trunk, the thesis makes a study on optimal control of dynamic Bidirectional Green-Wave. The research mainly includes several parts as follows:

Some discussions on the concept and target of Bidirectional Green-Wave are done, and the models of Bidirectional Green-Wave are constructed by the analysis of the property indexes in traffic control, also the thesis makes the study on the models of Bidirectional Green-Wave and the basic concepts and principles of multi-objective optimization. In the end, the optimization objectives-delays and parking rates are given. After the above discussion, the thesis optimizes the models of multi-objective by Particle Swarm Optimization(PSO), and gives the detail description of basic optimal steps.

Secondly, the thesis discussed the layout of traffic acquisition sensors in the main road. On condition of the different roads, this thesis give some discussions on the reasonable layout of traffic acquisition sensors to have a good collection of accurate traffic parameters and traffic

signals in the main road. And the whole ideas about the layout of traffic acquisition sensors are given.

Thirdly, taking as the research background of two adjacent intersections of Baixia Road, Nanjing, the optimization control scheme of Green-Wave are analyzed, which proves the method is efficiency and feasible.

Keywords: Green-Wave; Particle Swarm Optimization(PSO);
Layout of traffic acquisition sensors;