

大连理工大学

硕士学位论文

单交叉口自适应控制方法的研究

姓名：李晓娜

申请学位级别：硕士

专业：计算机应用技术

指导教师：谭国真

20061201

摘 要

本文以城市交通信号控制系统中的单交叉口为研究对象,通过对单点自适应控制方法的研究,旨在改善单点的控制效果。本文分别对两种自适应控制方法进行了研究,即基于优化的方法和基于模糊逻辑的方法,并对已有方法进行了改进,然后通过仿真实验验证了方法的有效性和合理性。另外,本文对恶劣天气信号控制进行了分析和研究。

首先,本文对基于优化的方法进行研究。提出了一种满足不同交通需求的多目标信号配时模型,并采用遗传算法进行求解。该模型能够根据交叉口的流量状况,选择不同的性能指标。在低流量比条件下,以延误和停车次数作为性能指标;在高流量比条件下,以通行能力和延误为性能指标。因此,其配时方案更加合理。

其次,本文对基于模糊逻辑的方法进行研究。首先实现了传统的模糊控制方法,然后对基于相序优化模糊控制方法进行了研究,设计并实现了该方法。然后,通过仿真实验比较了本文提出的基于遗传算法优化的方法,传统的模糊控制以及可变相序的模糊控制各自的性能,实验表明了本文提出的基于遗传算法优化的多目标信号配时模型方法与定时控制相比,具有较好的性能,特别在高流量比条件下,能有效地提高交叉口的通行能力。可变相序的模糊控制方法能够更好的用于流量变化比较大的交叉口。

再次,本文针对恶劣天气下自适应控制方法进行了分析。恶劣天气包括雨、雪、雾、沙尘暴等对道路和交通产生很大的影响,因此恶劣天气下的交通控制具有十分重要意义。国外在这一方法的研究已经取得了一些成果,通过总结国外的研究现状及研究的思路,希望对国内的研究提供一些启示。

最后,总结全文的工作,并指出若干有待于今后进一步研究内容。

关键词: 单交叉口; 自适应控制; 信号配时模型; 模糊控制

Study on Adaptive Control Method for a Single Intersection

Abstract

This paper takes a single intersection as research object. Through the study of the adaptive signal control methods for a single intersection, it's expected to improve the performance of a single control. This paper studies on the two methods respectively, the optimization based method and the fuzzy logic based method. Then a new method is proposed and tested by the simulation test. Also, the inclement weather adaptive traffic signal control is analyzed and researched.

Firstly, the optimization based method is studied. A new multi-object signal timing model which meets the different traffic demands is proposed and solved using genetic algorithm. This model can select different performance indexes according to different traffic conditions. Under the low flow ratio conditions, it selects delay and stops as the performance index; under the high flow ratio conditions, it selects capacity and delay as the performance index. So the signal timing is more reasonable.

Secondly, the fuzzy logic based method is studied. The traditional fuzzy controller is implemented. Then changeable phase fuzzy controller is studied and applied to the low flow conditions in the night. The simulation test compares the performance between the GA optimization based control, the traditional fuzzy control and the changeable phase fuzzy control. The simulation test shows the multi-object signal timing model based on GA optimization method has better performance compared with fixed timing. Especially under the high flow ratio conditions, it can improve the capacity of the intersection efficiently. The changeable phase fuzzy control method proves to be very efficient for the intersection with changeable traffic flow.

Thirdly, the inclement weather adaptive traffic signal control is analyzed. The inclement weather includes rain, snow, fog and so on which has a lot impact on the roads and the traffic. So the research is quite significant. And there is some research and some applications in the foreign countries. Through summarizing the current research conditions in the foreign countries, it's expected to provide some enlightenment for the future research.

In the end, summarizing the whole work, and pointing out some content which would be researched in the future.

Key Words: Single Intersection; Adaptive Control; Signal Timing Model; Fuzzy Control

独创性说明

作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名： 李晓娜 日期： 2007.1.6

大连理工大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部或部分内
容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 李婉娜

导师签名： 谭同喜

2007年1月6日

1 绪论

1.1 研究背景

交通运输是城市功能活动的命脉，它直接影响社会经济、生产与生活的各个方面。随着现代城市化的发展，交通问题已经日益成为世界性的难题，城市交通事故、交通阻塞和交通污染问题愈加突出。就以我国为例，仅2003年就有交通事故667,507起，造成104,372人死亡，494,174人受伤，直接经济损失高达33.7亿元^[1]。目前，我国平均每一分钟就有1人因交通事故受伤，每五分钟就有1人交通事故死亡。同时，由于交通的阻塞和拥挤，对全球的经济带来了巨大的影响。在美国，1984年由道路阻塞所造成的交通延迟大约有12亿车时(Vehicle-hours)，由此对用户所造成的损失在1990年估计达1000亿美元之巨。据估计2005年，美国的交通延迟会达到每年69亿车时，将有73亿加仑的燃料浪费于公路交通拥挤，到2010年，美国由于交通拥挤而浪费的行驶时间将上升57%；每年因交通拥挤造成额外的燃油消耗就高达90亿美元。在英国，一个大约具有100个平面交叉口的城市内，每年由于车辆延误造成的经济损失就为1400万英镑。在我国，百万人以上的大城市每年由于交通拥挤造成的经济损失估计约1600亿人民币，相当于我国国内生产总值的3.2%。而且，城市交通问题还派生出了其他的城市问题。例如，城市生态环境状况也不容乐观，交通工具排放的废气已经成为破坏大气环境的重要污染源。据统计，目前，大气中的70%以上的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)和硫化物(SO_x)等有害气态污染物主要是由汽车排放造成的。严重的环境污染不仅导致了高昂的经济和环境成本，而且对公共健康产生了损害。同时由于交通设施建设的需要，土地资源正以2%-3%的速度不断减少，更是加重了污染的严重程度^[2]。

所以，城市交通问题已经引起了各个国家的重视，解决交通拥挤与堵塞已经迫在眉睫。在多数情况下，交通拥挤与堵塞问题必须通过修建更多、更宽的道路和其他交通设施从根本上解决。然而，有限的空间和其他经济、环境等问题阻碍交通基础设施的进一步扩展。为了从根本上解决城市交通的拥挤和堵塞问题，除了改善城市建筑群的合理分布、拓宽城市交通要道、增强人民的交通意识外，更重要的是引进高新技术来改造现有道路系统以及管理系统，从而大幅度提供路口、路网的通行能力和服务质量。随着研究的深入，系统的功能扩展到道路交通运输的全过程及其相关的服务部门，发展成为带动道路运输现代化的智能交通系统(ITS: Intelligent Transportation systems)。智能交通系统是将先进的信息技术、数据通讯技术、电子技术、控制技术及计算机网络技术等有效的集成运用于整个交通管理系统而建立的一种在大范围内、全方位发挥作用的、实时、准

确、高效的综合交通运输管理系统件明。ITS将从根本上改变人们出行和交通管理的状况，带来巨大的经济和社会效益。据初步估计，ITS技术的应用可减少10%的废气排量，20%的交通延时，30%的停车次数。据报道，美国Los Angeles地区和Texas州在ITS技术方面投资的效益成本比率分别是16:1和22:1，收益非常显著。

城市交通控制研究的起源比较早。1868年，英国伦敦燃汽信号灯的问世，标志着城市交通控制的开始。1913年，在美国俄亥俄州的Cleveland市出现了世界上最早的交通信号控制。1926年美国的芝加哥市采用了交通灯控制方案，每个交叉路口设有唯一的交通灯，适应于单一的交通流。从此，交通控制技术和相关的控制算法得到了发展和改善，提高了交通控制的安全性、有效性并减少了对环境的影响^[2]。

进入20世纪70年代，随着计算机技术和自动控制技术的发展，以及交通流理论的不完善，交通运输组织与优化理论和技术水平不断提高，控制手段越来越先进，形成了一批高水平有实效的城市道路交通控制系统。当前世界各国广泛应用的具有代表性的且具有实效的城市交通控制系统有英国TRANSYT(Traffic Network study Tool)交通控制系统、英国的SCOOT(split cycle and offset optimization Technique)和澳大利亚SCAT(Sydney Coordinated Adaptive Traffic Method)系统。这些系统已经在发达国家的城市交通信号控制中获得了成功应用。

目前国内已有的一些交通控制与管理系统，在整体性能比国外同类系统仍有较大差距，只在一些中小城市得到一些应用。目前国内城市尤其是大城市引进的交通控制系统大部分为进口的SCOOT和SCATS系统。这两种系统的控制硬件及软件已经比较完善。但非常遗憾的是这二种系统都是封闭的，其各自系统自成体系，系统开放性很差。但是由于我国特有的三元混合型交通环境，国外的交通控制系统不能很好的适应我国的交通流变化状况，因此控制效果也难免会不尽人意。所以迫切需要开发适合我国国情的、具有我国自主知识产权的ITS系统。

正是基于我国的研究状况，我们实验室正致力于研究新一代交通信号控制系统。该系统能够实现交通流在时间分布上的优化控制和空间分布上的合理分配，以及突发事件交通信号的应急控制。不仅解决了国内的特殊交通情况，更适合我国国情。本文的研究正是基于这样的背景开展的。

由于交通信号控制根据控制范围的不同，可分为三种。分别是：单点控制，干线控制，区域控制，即“点控”、“线控”、“面控”。单点控制是线控和面控的基础，因此，本文以单交叉口为研究对象，对自适应控制方法进行系统的研究。为线控和面控的研究打下了坚实的理论基础。

1.2 单交叉口研究的意义

我国目前的信号控制系统以单点控制为主，主线信号控制、区域信号控制较少。据全国城市交通管理“畅通工程”专家组调查。仅有不足1%的信号交叉口进入主线信号控制或区域信号控制，99%以上的均是单点控制，并且，随着交通量的增加，单点控制信号交叉口的数量还在不断增加^[3]。可见，要提高我国城市道路交叉口的通行能力，首要任务是提高单点控制信号交叉口的通行能力。所以把单点信号控制作为提高通行能力的有效措施。

此外，城市区域控制中还存在以下两个问题：

(1) 在现代城市交通中，存在一些交叉口，他们与周围的交叉口相距比较远，该路口的信号调整不会影响相邻路口的交通流；而相邻路口的交通信号的改变也不会影响本路口的交通状况。我们称这样的路口为孤立交叉口，如果对这些路口采用区域协调控制，可能不会达到很好的控制效果。国外实践表明：对于相距1Km，且需求较大的交叉口，采用单点控制的效果要明显优于区域控制^[4]。

(2) 对交通流变化比较大的交叉口，其区域控制效果就不如单点控制方式效果理想。一个主要原因是处于同一控制区域的所有路口都必须同周期，系统会对主道车流进行协调控制，另外一个原因是现有的SCOOT区域控制系统不能进行相序的变化。这样就无法避免地会出现一个方向绿灯时间无车或行人通过，而另一个方向车辆和行人却遇红灯等待现象。这一点也是大连交警在实际控制中发现的问题。

因此，单交叉口的研究既是很必要的，也是很重要的。

1.3 自适应控制方法研究的意义

单点控制的发展经历了最简单的定时控制—感应控制—自适应控制的过程。下面具体介绍各种控制方法的控制原理及优缺点。

(1) 定时(定周期)控制

在定周期信号控制中，以历史的交通流统计数据依据，找出每个日/周和时/日不同交通流变化规律。用人工的方法和计算机仿真方法预先准备好不同日/周和不同时间区间(时段)所使用的配时方案，即周期长度、绿信比和相位差组成的控制参数组合。采用程序存储方式将这些配时方案存储在信号控制器或中心计算机中。(可分为单时段，多时段控制。单时段全天都只有一种配时方案。多时段是根据一天中交通量的波动情况，划分若干时间区段，对应于每一时间区段的平均交通量制定相应的配时方案)。

定时控制的控制简单，但仅适用于交通流量比较稳定的交叉路口，不能随着交通状况的实时变化而改变配时方案。

(2) 感应控制

感应式信号控制在定时控制基础上发展而来的,是一种智能的控制方法。它通过在路面上设置检测器,来获取交通流信息,为信号配时提供依据,使得信号配时方案的实时性有了很大的提高,在一定程度上弥补了定时控制的不足。感应控制分为半感应控制和全感应控制。

半感应控制主要用在主次干道相交的交叉口,在这种信号控制中,仅需在支路上安装检测器,通行权通常是给予主干道上的交通流。只有当在支路上的检测器检测到车辆后(并且主干道上的最大绿灯时间已经运行完毕),通行权才立即转到支路上。随后,支路上的绿灯时间可根据交通需求延伸到最大的绿灯时间。当通行权转到主干道上之后,就必须在运行完最大绿灯时间后才进行通行权的转换。该控制方式的周期长度和绿灯时间可根据实际需要随时进行调整,当次干道没有车辆时,主干道总保持常绿,分配到次干道的绿灯时间被充分利用,所有“多余”绿灯时间都分配给主干道。

在全感应工作方式下,绿灯时间和周期根据交叉口检测器检测的交通流量的大小而变化。通常,相位的顺序是事先规定好的,此外每个相位的最大和最小绿灯时间也是事先确定好的。但是可以设置可选相位,在此相位中,如果没有检测到车辆的到达,那么就可以跳过该相位,继续运行其它的相位。

感应控制适用于饱和度较低的交叉路口或各向交通流相差较大的交叉口的控制。特别是交通流没有明显的变化规律,随机性较强的时候,效果更为明显。当各向交通流接近道路允许的通行能力时,绿灯时间经过调整必然要接近各方向允许的最大绿灯时间。这时的感应控制与定时控制实际上并无区别。

然而感应控制在实际应用中存在一些问题^[5],使得控制效果并不很理想,主要包括如下两点。

① 不能充分利用绿灯延长时间。单位绿灯延长时间的长短必须能使车辆从检测器开出停车线。而且要尽可能的短。但是在实际应用中,很难保证单位绿灯时间恰好取到这个值,通常单位绿灯延长时间比实际的值要大,这样就造成绿灯时间的损失。由于当前相位处于绿灯时,冲突相位就一直处于红灯状态,所以,当冲突相位的排队长度很长时,整个交叉口效能就会降低。

② 最大绿灯时间的确定也很难。通常,最大绿灯时间是根据各个相位的交通流状况来分配绿灯时间。由于交通流的波动性比较大,所以采取固定的最大绿灯时间不能实时反映交通状况。为了保证交叉口的效益达到最优,可以每隔一段时间就对最大绿灯时间进行调整,但是这样会增加交通工程师的负担,而且也经常被忽视。

(3) 自适应控制

正因为感应控制存在这样的缺点，人们设想能否设计一种控制策略，既能实时响应交通又能避免感应控制的问题。因此，自适应控制方法就产生了。

自适应控制方法通常包括两类：一是在线生成式，即通过车辆检测器，实时采集交通流量数据，在线求解最佳信号配时方案，然后进行信号控制。该方法能够及时响应交通流的随机变化，控制效果好，但实现复杂。

二是方案选择式系统，根据不同的交通流，事先求解各种配时方案，储存在中心计算机内，系统运行时按实时采集的交通流量数据，选取最适用的配时方案，实施信号控制。

然而，随着研究的深入，自适应控制的研究已经超过了最初的范围，目前国外对自适应控制研究内容已经扩展为：不仅能适应交通流的变化，而产生最优配时方案，而且还能适应天气的变化即恶劣天气下的信号配时。我在本文的后续章节也将对其进行简单的介绍。

总之，由于其灵活性、可用性和最优性，自适应控制方法将成为信号控制研究的主流^[6,7]。所以，我们对单交叉口的自适应控制方法进行研究，是非常有意义的。

1.4 单交叉口自适应控制的研究现状

自从Miller在1963年提出一种基于在线交通模型的控制策略时，自适应控制方法的原理才第一次被使用。目前自适应控制方法主要分为两类：基于优化的方法(也称基于模型的方法)和基于规则的方法^[8]。

基于优化的方法主要通过计算优化的性能指标模型，通常是延误或延误与停车次数的混合，来得出配时方案。代表性的系统主要有如下两个：

由交通研究实验室开发的英国的MOVA方法^[9]，在孤立交叉口控制中，是唯一一个基于数学优化的商业应用。MOVA在每个车道上使用两个车辆检测器，一个位于停车线前的40m，另一个位于100m。最初，每一个车道都分配足够长的绿灯时间以释放在40m检测器后排队等待的车辆。MOVA的控制策略混合了数学优化和启发式算法。当一个相位变为绿灯时，接下来要完成如下四步。

- (1) 每一个相位都有一个最小绿灯时间(通常为7s)。
- (2) 可变最小绿灯时间考虑第一个检测器和停车线之间的车辆数。
- (3) 只要有一个相关相位以饱和流量消散，则该相位就保持绿灯。为了检查饱和流量，MOVA检查当前的车间距，有时候是当前车间距与以前车间距之和，并与预定的临界间距值比较。
- (4) 当所有相关链路的交通流量低于饱和流量，优化程序就开始启动。直到这时才

启动的原因是通过TRL的仿真研究表明当交通以饱和流率发散，其需要足够长的绿灯时间来完全清除等待的队列，此时通常可以获得最小的延误。优化算法是受Miller启发，但是更复杂。在优化过程中，MOVA使用一种微观交通模型。每个车辆的位置可以通过IN检测器和停车线之间的距离来计算。每隔半秒钟，MOVA计算延长当前相位的绿灯时长0.5s, 1.0s, 1.5s, 交叉口的总延误是否为最小。MOVA能够自动识别过饱和情况，并采用通行能力最大化算法。

在英国20个站点尝试采用MOVA方法进行控制，结果表明采用MOVA方法后，延误平均降低13%，与早期的感应控制方式相比。同时，MOVA也能较少高速公路上信号控制站点的交通事故的发生。

瑞典的Kronorg et al. 在1997年开发出了SOS(Self Optimizing Signal Control)方法，并进行了现场测试。当绿相位开始后，SOS方法开始计算中止该相位后延误，停车，环境和安全费用，计算公式是一个费用函数。将计算结果与正在等待的红灯相位的费用进行比较。该计算是基于不久的将来(0.5s-20s)之间的交通流预测的结果。通过交通和交叉口模型可以得到该结果。如果继续该相位使得不久的将来的费用降低，则该相位不会中止；否则，就要中止该相位。计算和预测每秒钟要更新两次。当确定了该相位的中止时刻时，SOS算法会在12s内计算事故最小函数，以找到一个安全的结束时间。在过饱和和情况下，算法会平衡各个方向上等待的时间。

在基于规则的方法中，策略的制定只依赖于预定的规则。该方法也需要评估性能指标。然而，性能指标并不需要优化，而是与阈值进行比较，然后做出短期的决策。常用的方法是模糊控制，目前利用模糊控制来实现的系统比较少。代表性的是芬兰的赫尔基辛理工大学的Niittymaki实现了一个两相位的模糊控制信号机，并在2001年采用此模糊控制信号机在一交叉口进行了现场测试，结果表明该模糊控制信号机比感应控制信号机在延误，停车次数和能源节省等方面能取得更好的效果。

我国对自适应控制研究的比较晚，目前的研究也只涉及到理论上的研究，还没有真正实现一个系统。主要代表性的研究^[10-12]有：

在基于优化的方法研究上：同济大学的杨锦东研究了信号交叉口在非饱和条件下，信号周期与相关因素的关系，提出了以延误最小、排队车辆数最小为目标函数，以饱和度和为约束条件，采用多目标优化的方法，对周期时长进行优化。东南大学的顾怀中、王炜等针对我国城市道路交叉口的交通流特性，在考虑交叉口的延误、停车及通行能力的情况下，提出了交叉口交通信号配时的模拟退火全局优化算法，对交叉口的信号周期时长进行优化。武汉大学的张媛媛在同时考虑停车率和延误情况下，以油耗为目标，建立单点实时信号模型，并通过禁忌搜索算法(TabuSearch)对模型进行求解。

在基于规则的控制方法研究上：我国徐东玲等学者也提出了基于感应控制思路的单路口模糊神经网络控制方案，仿真结果也较为理想。我国陈森发等学者提出了关键车流和非关键车流的概念，分析了非关键车流对控制效果的影响，在此基础上对Pappis算法进行了修正，仿真结果优于Pappis方案。

1.5 本文的主要工作

本文的主要工作概括为如下几个部分：

(1) 提出一种新的信号配时模型并利用遗传算法优化。

本文针对低流量、高流量两种情况，提出了不同的信号配时模型，这样在低流量下能够尽量减少车辆延误和停车次数，在高流量情况下能够增加道路的通行能力，能够满足不同条件下的交通需求。在模型的求解上，本文选择遗传算法来进行优化。通过对多组测试用例进行分析，发现该模型在减少延误，增大通行能力等方面，确实比传统的定时方法优越。

(2) 基于模糊控制的单交叉口控制方法的研究。

本文首先对经典的模糊控制方法进行研究，并进行了仿真实验，结果表明模糊控制在较少交叉口延误方面确实比基于数学模型的方法更优。然后，本文设计实现了一种可变相位的模糊控制方法，并将其应用在夜间流量比较小的交叉口的控制中，仿真结果表明此方法能够有效进行相序切换和分配绿灯时间，特别对流量变化比较大交叉口，具有较好的控制效果。

(3) 对恶劣天气下的信号配时方法的研究。

自适应控制不仅要适应交通流的变化而调整配时方案，还要对恶劣天气下交通流的变化，做出响应。而目前的大多数自适应控制系统都没考虑恶劣天气的影响，仍然采用正常条件下的配时方案。本文首先总结了目前国外对恶劣天气下的控制方法的研究现状，然后对他们的方法进行了分析，为我们以后的研究提供了启示。

1.6 论文的组织结构

文章剩余部分组织如下：

第二章主要介绍了交通信号控制的基本理论。包括信号控制基本概念，信号配时设计与相序设计之间的关系，以及交叉口常用性能指标公式等。

第三章主要针对基于优化的控制方法进行研究，通过对现有的方法的研究，提出一种新的信号配时模型，并采用遗传算法进行优化求解。

第四章为基于模糊控制的单点控制方法的研究。首先阐述模糊控制的基本理论，然后将模糊控制与交通控制的结合进行了分析，设计并实现了传统的模糊控制方法。为了

解决交叉口各相位交通流变化比较大的情况，提出了一种可变相序的模糊控制方法，并进行了设计。

第五章利用MATLAB对上述方法进行仿真。仿真结果表明，采用基于遗传算法优化的方法，在高流量比条件下，通行能力比定时控制方法提高8%左右；在低流量比条件下，延误比定时控制方法降低4%左右。对可变相序的模糊控制与传统的模糊控制进行对比，可变相序的模糊控制方法更适合于交通流变化比较大的交叉口。

第六章为恶劣天气下自适应控制方法的研究。主要分析了国外一些城市在恶劣天气下的自适应控制研究上取得的成果，主要的研究思路，以及对我们的启示。

最后对全文进行总结和展望，阐述了在自适应控制方法研究中需要进一步优化的地方。

2 交通信号控制的基本理论

本文首先给出了交通信号控制的基本概念,包括:信号相位,信号阶段,周期长度,绿信比,相位差,绿灯间隔时间,有效绿灯时间等,然后介绍了常用的交叉口性能指标及其计算方法,最后给出了常用单交叉口的信号配时方法。这些研究为后面的信号配时模型及优化方法的研究奠定了理论基础。

2.1 交通控制的基本概念

交叉口信号配时参数优化,首先必须准确把握和理解交通控制中的一些基本概念。下面对信号配时设计中部分参数作一介绍^[13]。

(1) 信号相位:在一个信号周期内,具有相同的信号灯色显示的一股或几股交通流的信号状态序列称作一个信号相位。信号相位是按车流获得信号显示的时序来划分的,有多少种不同的时序排列,就有多少个信号相位。

(2) 周期长度:信号周期是指信号灯灯色任何一个完整的循环。周期长度是指信号灯运行一个循环所需的时间,等于绿灯、黄灯、红灯时间之和。

(3) 绿信比:是指在一个周期内(对一指定相位),有效绿灯时间与信号周期长度之比。

(4) 相位差(又叫绿时差或绿灯起步时距):相位差是针对两个信号交叉口而言,是指两个相邻交叉口它们同一相位绿灯(或红灯)开始时间之差。

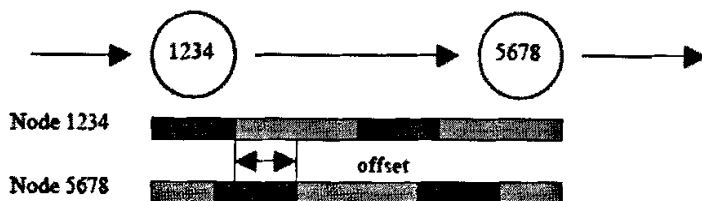


图 2.1 相位差示意图

Fig. 2.1 The diagram of offset

它分为绝对相位差和相对相位差。相对相位差是指在各路口的周期时间均相同的联动信号系统中,相邻两个交叉路口协调相位的绿灯起始时间之差。绝对相位差是指在联动信号系统中选定一标准路口,规定该路口的相位差为零,其他路口相对于标准路口的相位差叫绝对相位差。如图2.1所示,Node代表一个交叉口或人行横道。

(5) 绿灯间隔时间：是指从失去通行权的相位的绿灯结束，到下一个得到通行权的相位绿灯开始所用的时间。绿灯间隔时间的长短主要取决于交叉口的几何尺寸，因此，要确定该时间的长度就必须首先考虑停止线和潜在冲突点之间的相关距离，以及车行驶这段距离所需的时间。

(6) 有效绿灯时间：是指被有效利用的实际车辆通行时间。它等于绿灯时间与黄灯时间之和减去损失时间。损失时间包括两部分，一是绿灯信号开启时，车辆启动时的时间；还有绿灯关闭、黄灯开启时，只有越过停止线的车辆才能继续通行，所以也有一部分损失时间。即为绿灯时间减去启动时间加上结束滞后时间。结束滞后时间是黄灯时间中有效利用的那部分。每一相位的损失时间为 $I = \text{启动延迟时间} - \text{结束滞后时间}$ 。

在实际工作中，损失时间的精确计算时非常困难的，也没有必要。通常取绿灯时间代替有效绿灯时间。如图 2.2 所示。

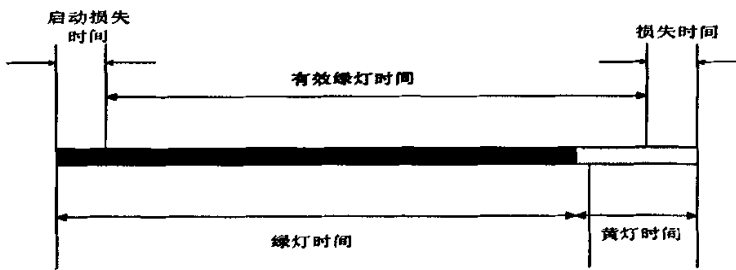


图 2.2 绿灯时间示意图
Fig. 2.2 The diagram of green signal

2.2 相位、相序设计与信号配时

2.2.1 相位、相序设计与信号配时的关系

无论采用哪种控制方法，都需要先了解交叉口的几何状况，交通流状况，然后制定相应的相位，相序方案以及配时方案，只有选择合适的相位和配时方案，才能使交叉口的运行效果达到最优。交叉口相位方案和配时设计是信号控制方案设计的两个方面，属于定性和定量的关系^[14]。

相位方案设计是信号设计的第一步，它直接影响交叉口交通流的安全性，以及交叉口的延误、通行能力等各项运行效益。美国道路通行能力手册HCM早已提出：“信号设计中最为关键的问题是选择一个适当的信号相位方案”。

配时设计是在相位方案设计的基础上进行的，根据进口车道配置，交通流情况来求

解最优配时方案，最终达到提高交叉口实际通行能力、减少车辆通过交叉口的延误的目的。只有在充分研究和采用最佳相位方案的前提下，利用配时参数优化模型，才能得到真正的最优控制方案，即最优解。否则，选用不适当的相位方案，再先进的配时模型也只能得到伪最优解。

2.2.2 相位设计

相位方案是相位的组合方式，有必要从多个组合中选出最佳的相位方案。一般来说，交叉口形状越复杂，相位方案也越复杂^[15]。

相位选择可分为相位初选和相位调整两步。相位初选时，只能运用经验判断，通过画出交通流线，合并部分交通流来缩小可选范围，初步确定相位相序(Phase Sequence)，并作为信号配时的基础。当信号配时完成后，将会对各参数进行试算评价，对相位进行必要的修正和调整，并重新评估，直至满足设计要求，形成最终方案。

确定信号相位时需要考虑以下几点^[15]：

(1) 交通安全

交叉口交通流之间的冲突是造成交通事故的一个重要原因，一般来说增加相位数，减少同一相位中冲突方向交通流的数量，可以提高安全性。

(2) 交通效率

交叉口相位设计要提高交叉口的时间和空间资源的利用率。过多的相位数会导致相位交替次数增加，也即损失时间的增加，从而降低交叉口通行能力和交通效率。反之，太少的相位也会使交叉口因混乱而降低效率。

(3) 交通状况

交通状况包括机动车交通量、左右转率、车道饱和流率、大型车混入率、非机动车流量流向、横过行人数量等。

(4) 交叉口几何条件

交叉口的限制条件包括：交叉口的类型、进口道车道数、交叉口扩展车道的展宽长度、行人和自行车过街的组织形式(如是否采用二次过街的组织方式)。这些因素影响机动车左转专用相位的设置、车辆排队长度等。

(5) 协调控制的要求

为了保证协调控制效果，相同子区内的信号要具有一致性，各交叉口的相位相序须相互匹配，否则不利于驾驶员适应。

2.2.3 相序安排

信号相位设计不但要考虑相位组合，还要考虑相位的衔接问题。通常需要考虑以下

几点:

(1) 对同一个交通流设置两个以上信号阶段时,在时间上应尽可能保证连续性,对于行人信号可不局限于此原则。

(2) 对同一进口道车流中不同流向交通流在不同信号相位放行时,尽可能保证它们所在信号相位的连续显示。

(3) 一向含直行车流的相位与另一向含直行车流的相位不宜连接。

(4) 一向含左转车流的相位与另一向含左转车流的相位不宜连接。

(5) 两向相位相序设计应尽量对称,便于驾驶员理解。

(6) 于直行与左转机动车,应考虑左转车道可停放的车辆数。若到达的左转车辆超出该车道可停放的左转车辆数时,需先放行左转车。反之,则先放行直行车。在一般路口和有左转等候区的路口多是先放直行车,后放左转车。

(7) 有特殊方案相位,其前后应尽可能衔接与特殊方案相容的基本方案。

本文主要研究信号配时参数的优化设计,所以不对相位,相序的设计方法进行深入的研究。

2.3 交叉口常用性能指标及计算方法

一般来说,信号交叉口的控制效果是由延误、停车次数、通行能力和饱和度等四个基本参数来衡量的。这些参数不仅反映车辆通过交叉口时的动态特性,同时它们也作为交叉口信号配时参数优化的依据,用于建立优化模型和目标函数。也就是说,信号配时参数优化的目标就是在一定的道路条件下,对配时参数选取合适的值,让通行能力稍高于交通需求,并且使得通过交叉口的全部车辆总延误时间最短或停车次数最少。

当然,除了上述四项基本评价指标以外,还有一些其它评价指标,例如:车辆运营费用(包括燃油消耗、轮胎和机械磨损)、废气排放量、噪声污染、运营成本(计入乘客旅程时间折合的经济价值等)以及安全舒适程度的差异等等。但这些都是由上述四项基本评价指标派生出来的次级参数,即以延误时间和停车次数为自变量的函数,常称作“辅助参数”。

下面具体介绍延误、停车率、通行能力和饱和度^[16,17]。

2.3.1 延误

延误是由于交通干扰、交通管理和控制设施等因素引起的车辆运行时间损失。由于延误能反映了司机不舒适、受阻的程度以及油耗和行驶时间损失,所以是最常用的评价信号交叉口运行状况的指标。

根据交通流运行特性和延误产生的原因,信号交叉口延误可分为三种:均匀延误、

随机延误和过饱和延误。均匀延误使假设车辆均匀到达时产生延误；随机延误是由于信号周期内，车辆到达的随机波动性造成的；过饱和延误是车辆到达超过了信号交叉口的通行能力时，滞留车辆额外经受的延误。研究人员在分析延误时，习惯上把后两种延误定义为增量延误。因此，常用的延误公式往往有两项构成：均匀延误 d_1 和增量延误 d_2 。

另一方面，从引起延误的原因来分析，均匀延误往往是由于信号灯的作用引起的，其为车辆必然经受的延误，随机性因素较少；增量延误是由于个别周期车辆不能释放完，或过饱和引起的延误。当饱和度小于 1 时，增量延误往往是由于个别周期车辆不能释放完引起的，具有随机性，也有的文献用随机延误来描述，早期的研究主要是针对该情形。均匀延误反映了交通流流体的特性，可更好的由流体理论来描述；增量延误部分则代表了交通流的随机性，可用排队模型刻画。

对于信号交叉口的计算可根据模型对进口道饱和度适应程度的不同，可将延误的计算模型分为以下三种：即稳态延误、定数延误模型、协调变换模型。下面对这几种模型进行简单介绍。

(1) 稳态理论(Steady-state Theory)延误模型

稳态理论延误模型适合于交通负荷较低的情况，模型的建立基于如下基本假定：

- ① 车辆平均到达率在所取的时间段内是稳定不变的，通常服从泊松分布；
- ② 交叉口进口断面的通行能力在所研究时段内为常数，且到达率不能超过通行能力；
- ③ 车辆受信号阻滞所产生的延误时间与车辆到达率的相关关系在整个时间段内不变；
- ④ 对整个时段 T 而言，车辆到达和离去保持平衡，个别周期内可以出现车辆过饱和和排队。

20 世纪 60 年代，韦伯斯特(Webster)、阿克塞立科(Akcelik)、米勒(Miller)、沃诺(Ohno)等人利用理论推导、计算机仿真等方法，分别给出了多种稳态延误模型，这些延误模型计算结果相差甚微。其中，韦伯斯特延误模型最为常用，见式(2.1)；而阿克赛力克的公式则较为简洁，见式(2.2)。

① Webster 延误公式：

$$\bar{d} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-y)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65\left(\frac{C}{q^2}\right)^{1/3} x^{2+5\lambda} \quad (2.1)$$

其中， \bar{d} 为交叉口某相位平均车辆延误(s/pcu)， C 为周期长(s)， q 为进口道实际到达的交通流量(pcu/h)， y 为相位流量比， λ 为相位绿信比(有效绿灯时间与周期的比，即

$\lambda = g/C$), x 为相位饱和度(实际流量与通行能力的比, 即 $x = q/S\lambda$), S 为相位饱和流量 (pcu/h)。

式 2.1 是一个经典的计算相位车道延误的公式, 也是迄今为止应用比较多且效果比较好的少数几个计算延误的公式之一。公式中的第一项表示车辆的到达率为恒定值时产生的正常相位延误, 即均衡延误(Uniform Delay), 第二项和第三项则表示车辆的到达率随机波动时产生的附加延误, 即随机和过饱和延误(Random & Oversaturation Delay)。当饱和度较低时, 第二项和第三项所占的比重很小, 可忽略不计。但随着饱和度的增加, 第二、三项对计算结果的影响就愈来愈大了。所以, 这个公式适合于未饱和的情况, 饱和度越低越精确。

Webster模型虽然应用广泛, 但是其局限性也很明显: 当饱和度较大、逐渐趋近于 1.0 时, 按照该公式计算出来的延误值明显偏大, 饱和度更是不能大于 1.0。这是由它的稳态假设前提决定的。

通常修正的 Webster 延误公式为:

$$\bar{d} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\gamma)} + \frac{x^2}{2q(1-x)}$$

交叉口总延误公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i C(1-\lambda_i)}{2(1-\gamma_i)} + \frac{x_i^2}{2(1-x_i)} \right) \quad (2.2)$$

② Akcelik 延误公式:

平均延误

$$\bar{d} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\gamma)} + \frac{xN_s}{q}$$

其中, N_s 为平均溢流排队车辆数, γ 为相位流量比, λ 为绿信比, x 为饱和度, S 为饱和流量。

$$N_s = \begin{cases} \frac{1.5(x-x_0)}{1-x}, & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases}$$

$$x_0 = 0.67 + \frac{Sg}{600}$$

(2) 定数理论(Deterministic Theory)延误模型

稳态延误模型要求在相对长的时间内交通条件比较稳定(如到达率、服务时间等),这样才能达到平衡。在交通量较小的情况下,平衡条件容易满足,可用稳态延误模型估计延误;然而,当流量很大时,特别是达到或超过交叉口的通行能力时,稳态平衡就不复存在;另外高峰期交通量很不稳定,这与稳态平衡理论模型假设不符。因此,许多研究人员突破稳态平衡的条件限制,给出了新的假设条件下模型。其中具有代表性的论述是梅(May)提出的定数延误模型,此后,金伯(Kimber)又进一步研究了该模型。

定数理论的延误模型适合于高度饱和交叉口车辆延误的计算,它将过饱和和排队作为一种确定的情况来考虑。这类模型的建立,基于以下几条基本假定:

- ① 车辆到达率在一段时间内为一恒定值,且大于交叉口通行能力;
- ② 在绿灯初始时刻车辆排队长度为 0;
- ③ 采用固定信号配时,故在观察时间段内通行能力为一常数;
- ④ 过饱和和排队长度随时间的延伸而直线增加。

在整个观察时段 T 内,每一辆车的平均延误时间 \bar{d} 为:

$$\bar{d} = \frac{Qr}{2q} + \frac{N_d}{q}$$

其中, \bar{d} 为每一辆车的平均延误时间(s), Q 为该进口方向通行能力(pcu/h), r 为红灯时长(s), q 为车辆到达率(pcu/h), N_d 为平均过饱和和排队车辆数,即某进口方向上所有车道排队车辆总和,

$$N_d = \frac{(q-Q)T}{2} = \frac{(x-1)QT}{2}$$

其中, x 为相位的饱和度, T 为观测时段长(h)。过饱和延误模型前一部分是在饱和度 $x=1$ 的情况下车辆的“均衡延误部分”,而第二部分则是“过饱和延误部分”。因此,交叉口总延误公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i q_i$$

其中, q_i 为第 i 相位的平均车流量。

(3) 过渡函数延误模型

由于稳态平衡模型和定数模型使用的条件不一样,前者对饱和度较小的情况较适用;后者对饱和度相对较大时适用。因此部分学者在稳态模型和定数模型之间寻求一种过渡的函数,来协调二者。这一方法最开始由怀廷(whiting)提出,后来金伯(kimber)又在此基础上给出了过渡函数的详细推导过程。过渡函数的建立,不仅解决了饱和状态下车辆受阻程度的定量分析问题,而且弥补了被定数延误所忽略的随机延误情况。按照这种模型计算出的信号交叉口控制效果参数由三部分组成:正常相位部分、随机延误部分和过饱和延误部分。

阿克赛力克(Akcelik)利用协调变换的方法得出平均过饱和的延误模型与排队长度的过渡模型。实际上美国通行能力手册(HCM)上所提供的延误计算模型也是采用协调变换的方式得到的,同属于协调变换模型。

阿克赛力克平均延误公式为:

$$\bar{d} = \begin{cases} \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-y)} + \frac{Q_0}{C}, & x < 1 \\ \frac{c-g}{2} + \frac{Q_0}{C}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

其中, C 为周期时长(s), λ 为相位绿信比, y 为相位流量比, x 为饱和度。

$$Q_0 = \begin{cases} \frac{Ct}{4} \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{12(x-x_0)}{Ct}} \right], & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$x_0 = 0.67 + \frac{Sg}{600}$$

其中, g 为相位有效绿灯时间。

该延误模型由三部分组成:均衡延误、随机延误、过饱和延误。在式 2.3 中,大括号内的为均衡延误(分饱和与非饱和两种情况),而随机延误和过饱和延误是包含在 Q_0 的计算过程之中。它不仅解决了“准饱和”状态下车辆受阻程度的定量分析问题,而且也弥补了被定数延误模型所忽略的“随机延误”情况。

式 2.4 中的参数 t 为观察时段长度,它体现了瞬态延误模型与稳态理论对待过饱和情况的不同处理方法。稳态理论中也有可能出现个别周期过饱和的情况,但是“稳态”这个假设前提要求很快就能消除该周期的过饱和和影响而迅速回复平衡状态。瞬态延误模型遇到过饱和情况时,则不需要这个要求,无论过饱和情况持续多久,根据其持续时

间 t ，就可以应用上式来计算每车平均延误。显然， t 越大，延误也越大。

(4) 三种模型之间的关系

从图2.3可以看到，三种延误模型分别在不同饱和度条件下描述延误，在饱和度较低的情况下，协调变换模型与稳态延误模型比较接近，当饱和度接近1时，稳态延误模型计算结果会偏大，而定数延误模型的计算结果偏小，而协调变换的模型比较符合实际。所以对于饱和度较大的情况下，对延误应该采用协调变换模型进行延误的估算。

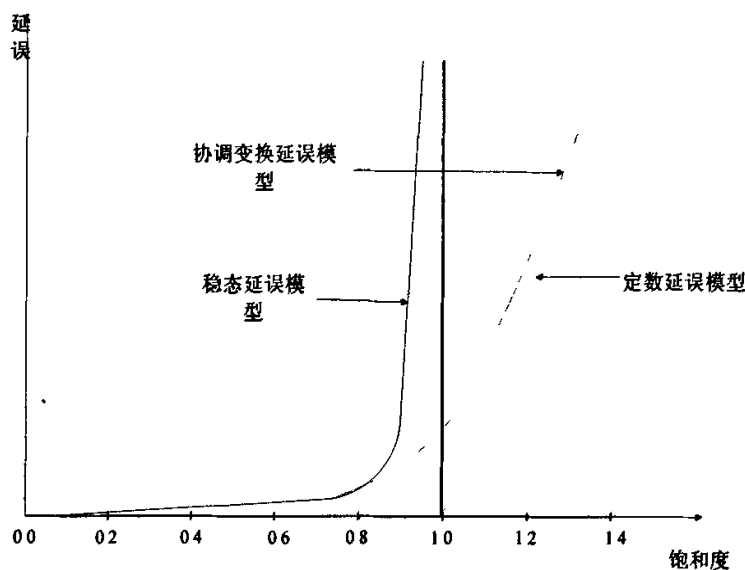


图 2.3 不同延误模型

Fig. 2.3 The diagram of different delay model

2.3.2 停车率

停车率：指每个周期停驶的车辆数占整个周期所到达车辆数的比例，它是一项信号交叉口评价的综合指标之一，停车率的大小不仅反映了交叉口的服务水平，同时从车辆耗油、环境及出行费用等几方面反映了信号控制的合理性。

众所周知，在信号交叉口总有一部分车辆在到达停车线之前会由于红灯或排队，而不得不减速甚至停车。同延误一样，停车次数通常也可通过模型来估算。主要包括稳态理论停车率模型和定数理论停车率模型。

(1) 稳态理论停车率模型

韦伯斯特和阿克塞立科先后研究了稳态理论条件下的停车率计算模型。其中，阿克

塞立科的模型是在韦伯斯特的模型基础上进行的改进。Akcelik 平均停车次数计算公式:

$$\bar{h} = f\left(\frac{1-\lambda}{1-y} + \frac{N_s}{qC}\right)$$

其中, \bar{h} 为某一相位的每辆车平均停车次数, f 为考虑了部分车辆不完全停车的停车率校正系数, 通常取 0.9. y 为流量比, N_s 为在不饱和交叉口, 平均过剩滞留车队长度, $e=2.718$ 。

$$N_s = \frac{e^k}{2(1-x)}$$

$$k = \frac{-1.33\sqrt{Sg}(1-x)}{x}$$

其中, g 为有效绿灯时间, C 为周期长(s), x 为饱和度, q 为进口道实际到达的交通流量(pcu/h)。总的停车次数公式(2.5)为:

$$H = 0.9 \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i(1-\lambda_i)}{1-y_i} + \frac{N_s}{C} \right) \quad (2.5)$$

(2) 定数理论停车率模型

根据梅、凯勒和金伯等人的研究结论, 过饱和交叉口车辆停车率为:

$$\bar{h} = 1 + \frac{N_d}{Sg}$$

其中, N_d 为平均过饱和滞留车辆数, Q 为进口方向的通行能力(pcu/h); T 为研究的时间段(h)。

$$N_d = \frac{(x-1)QT}{2}$$

2.3.3 通行能力

信号交叉口的通行能力是针对每一引道规定的, 它是在现行的交通、车道和信号设计条件下, 交叉口某一引道所能通过的最大流量。单位: 辆/h。整个交叉口的通行能力并不重要。

饱和流量: 在通常的道路、交通条件下, 在整个小时都是绿灯的条件下, 连续通过交叉口指定引道的最大流量。

所以, 可见影响信号交叉口的通行能力的主要因素有三个^[18]:

(1) 车行道条件, 即交叉口的几何条件。包括: 车道类型(专用车道), 车道数, 交叉口几何形状。

(2) 信号设计条件。即信号灯配时的各个参数及相序、相位设计。

(3) 交通流条件。每条引道的交通量, 流向, 流向内车型的分布。

美国 HCM 给出的饱和流量(率)计算公式为:

$$S = S_0 \times N \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{RT} \times f_{LT}$$

其中, S 为在通常条件下, 车道组的饱和流量, S_0 为每车道理想条件下的饱和流量, 一般取 1800/绿灯小时, N 为每车道组中的车道数。 f_w 为车道宽度校正系数, f_{HV} 为交通流中重型车辆校正系数, f_g 为引道坡度校正系数, f_p 为临近车道停车情况及该车道停车次数校正系数, f_{bb} 为公共汽车停在交叉口范围内阻塞影响作用校正系数, f_a 为地区类型校正系数, f_{RT} 为车道组中右转车校正系数, f_{LT} 为车道组中左转车校正系数。

通行能力是以饱和流量为基础进行分析的。交叉口的总通行能力通过对各进口车道组(引道)的通行能力之和。每一车道组的通行能力依据其车道功能不同按下式(2.6)计算:

$$C_i = S_i \times \lambda_i \quad (2.6)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{g}{T_c} \right)_i$$

其中, C_i 为车道组的通行能力, S_i 为车道组 i 的饱和流量(辆/绿灯小时), λ_i 为绿信比。

2.3.4 饱和度

饱和度是针对每一车道(车道组)而言的。计算公式如下:

$$X_i = (V/C)_i = V_i / [S_i(g/T_c)_i] = (V_i/S_i) / \lambda_i$$

其中, X_i 为第 i 个车道组的饱和度, V_i 为第 i 个车道组的交通流量。

相位饱和度是指该相位上各个车道组的饱和度之和。

交叉口的饱和度是饱和程度最高的相位所达到的饱和度值, 而并非各相位饱和度之和, 用 X 表示。从理论上说, 交叉口饱和度只要小于 1 就应该满足各方向车流的通行要求。然而, 实践表明, 当交叉口的饱和度接近于 1 时, 交叉口的实际通行条件将迅速恶化, 更不必说等于或大于 1 了。因此, 我们必须规定一个可以接受的最大饱和度限制, 即饱和度的“实用限值”。研究表明, 反映车辆通过一个交叉口时的一些特性参数,

如车辆平均延误时间、平均停车次数以及排队长度等等，均与饱和度实用限值的大小有关。实践证明，饱和度实用限值定在 0.8—0.9 之间，交叉口可以获得较好的运行条件。在特定条件下，例如交通量很大，而交叉口周围的环境条件较差，为减少交叉口建设投资，可以采用更高的实用限值——饱和度实用限值 0.95。

2.4 本章小结

本章首先介绍了交通信号控制的基本概念及理论，包括周期长、绿信比、相位等常用参数；以及信号控制两个主要研究内容，配时设计与相序设计之间的关系。然后，对交叉口常用的性能指标，包括延误、停车次数、通行能力、饱和度以及其计算方法进行了总结，为第三章信号配时模型的研究打下了基础。

3 基于遗传算法的单交叉口信号配时优化模型及方法研究

目前信号配时方法主要是 TRRL 和 ARRB 所提出的方法^[19]。而对于单点信号配时,大多还是采用 F.Webster-B.Cobber 理论和他们所提出的方法^[20],以下简称 Webster 方法。Webster 方法是在上世纪 50 年代提出来的,是以车辆通过交叉口的延误时间作为惟一衡量的指标,它的延误公式与平峰期间路口车辆的延误较为吻合,而高峰期间实际车辆延误时间比 Webster 计算延误时间要大。因此仅仅以延误时间作为惟一衡量的指标是不够的。为此,国内许多学者对此进行了研究。同济大学的杨锦东研究了信号交叉口在非饱和条件下,信号周期与相关因素的关系,提出了以延误最小、排队车辆数最小为目标函数,以饱和度为约束条件,采用多目标优化的方法,对周期时长进行优化。然而,此方法没有针对不同交通状况下的不同需求进行配时,而且,延误等指标采用同样的模型也不合理。

为此,文中选择了各相位的最大流量比之和作为确定交叉口的信号配时方法选择的主要约束条件,针对低流量比($0 < Y \leq 0.75$)、高流量比情况($0.75 < Y \leq 0.95$),分别采用不同的数学模型,建立信号配时模型。

3.1 多目标信号配时模型

信号控制的目的在于最大限度地提高交叉口的使用效率。一方面要以人为本,体现道路使用者的利益,使延误和停车次数尽可能小;另一方面,要合理利用道路交通设施,提高道路使用效率,使交叉口的实际通行能力尽可能大。因此要依据交叉口的交通特征,考虑多项交通效率与效益指标来确定信号配时模型,以便使用户利益与管理效率综合最优。

单交叉口控制的基本考虑是:在车辆稀疏的情况下,信号周期尽量短,以免无通行权相位的等待车辆等待时间过长而造成较大延误和排队,但信号周期不能太短,一般不能短于 $p*(10+3)s$ (其中 p 为相位数, $10s$ 为某一相位的绿灯时间, $3s$ 为黄灯时间),以免某一相位的绿灯时间过小,使车辆来不及通过路口而影响交通安全,同时也给行人和非机动车一些过街时间。而在交通流较大的情况下,加大信号周期,以减少相位转换的损失时间,提高路口通过率,信号周期不能太长,一般不能超过 $220s$,否则会导致由于某一相位的绿灯时间太长而使驾驶员心理上难以忍受。对于过饱和交通流,只能按信号最大周期控制,这时堵车不可避免,控制的目的是尽快消堵^[10,11]。

3.1.1 低流量比条件下的信号配时模型

在道路条件确定的前提下,在正常的周期时长范围内,周期时长越长,通行能力越

大,但车辆延误及停车率也随之增长。信号交叉口从延长周期时长所提高的通行能力远大于交通需求时,即饱和度很小时,对通车状况并无多大好处,却会无谓地增加车辆延误。

因此本文在流量比较低情况下的延误和停车次数作为目标函数,同时对周期和各相位的有效率绿灯时间进行优化。

(1) 性能指标公式的选取

由于Webster延误模型在低流量状态下具有良好的实用性,而且简单方便,所以本文采用式2.3中Webster修正模型对交叉口的延误进行估算。

在低流量状态下,对某一相位的停车次数的计算主要依据非饱和条件下的停车率计算模型,并结合该相位的车辆的到达率来确定。文中采用式2.6中的稳态停车率模型进行估算。

(2) 约束条件的建立

各相位有效绿灯时间: $15 \leq g_i \leq 60$, (仅考虑机动车流)

周期长: $C = \sum_{i=1}^n (g_i + l_i)$, l_i 为损失时间,通常取3-5s。

$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$, 通常 C_{\min} 取为30s, C_{\max} 取为120s。

(3) 目标函数的建立

本文采用加权系数法来确定信号控制的优化的综合目标函数,依据目标函数和约束条件,最终建立的模型如下:

$$f(C, g_1, g_2, \dots, g_n) = \sum_{i=1}^n \left[k_1 \left(\frac{q_i C (1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_i)} \right) + \frac{x_i^2}{2(1 - x_i)} + \frac{k_2^2 q_i (1 - \lambda_i)}{1 - y_i} \right]$$

经过整理得到:

$$f(C, g_1, g_2, \dots, g_n) = \sum_{i=1}^n \left[k_1 \left(\frac{q_i (C - g_i)^2}{2C(1 - y_i)} + \frac{g_i^2}{2C(1 - \frac{g_i}{C})} \right) + k_2^2 \frac{q_i (C - g_i)}{C(1 - y_i)} \right]$$

公式3.1中,取 $k_1^1 = 2Y \cdot \sqrt{S_i}$, $k_2^2 = \sqrt{S_i} \cdot \frac{1 - Y}{0.9}$ 。这里 k_1^1 、 k_2^2 的选取是综合文献^[10]

及考虑 k_1^1 随流量比的增加而增大, k_2^2 随着流量比的增大而减小,延误在整个表达式中的比重应该占有优势得到的。

所以,此优化问题可以描述成:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(C, g_1, g_2, \dots, g_n) = \sum_{i=1}^n k_i^1 D_i + k_i^2 H_i \\ s.t. 15 \leq g_i \leq 60 \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

其中, k_1 、 k_2 分别是延误时间、停车次数的加权系数。

从公式3.1可以看到, 主要含有以下几个变量: C , y_i , g_i , q_i , l_i 。其中, q_i , y_i , l_i 为输入变量; 而 C , g_i 为所求的变量, 即决策变量。

3.1.2 高流量比条件下的信号配时模型

当交叉口的流量变大时, 对实际通行能力的要求越高。在此条件下应把交叉口的实际通行能力作为信号控制参数优化的目标函数。上面已经提到, 一般的, 实际通行能力受周期的影响, 周期越大, 实际通行能力越大, 但当周期时长达到一定程度时, 实际通行能力接近信号交叉口的设计通行能力时, 通行能力的增加比较缓慢, 而延误也会急剧增加。

为了避免使交叉口一方进口道总延误的急剧增加, 在以通行能力作为优化目标的同时, 考虑用延误对其进行约束。因此, 本文在饱和度较大的条件下, 采用一个周期内的延误和通行能力为目标函数, 对周期及各相位的有效绿灯时间进行优化。由于延误最小的解与通行能力最大解很难同时存在, 所以只能通过协调二者的关系, 求解出全局最优解, 确定各相位最佳绿灯时间, 得到最佳周期。

(1) 性能指标公式的选取

Webster 在低饱和度的情况下是比较切合实际的。然而, 随着饱和度的增大, 车辆到达和驶发的“稳态平衡”就很难维持了, 因而按照 Webster 计算的结果与实际情况出入很大, 尤其是当饱和度接近 1 时, Webster 根本无法给出切合实际的结果。而过度函数的模型弥补了这种不足, 因此我们选择式 2.3 中的公式。

由于我们只考虑不饱和状态, 所以平均延误公式只取 $x < 1$ 部分。即:

$$\bar{d} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\gamma)} + \frac{Q_0}{C}$$

交叉口总延误公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n q_i \bar{d} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i C (1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_i)} + \frac{q_i Q_0}{C} \right)$$

关于通行能力公式，我们选择美国通行能力手册的计算方法，即公式 2.6。交叉口的总的通行能力为交叉口各个相位全部车流所能提供的最大允许通过量，即为：

$$Q_{ci} = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n \frac{S_i g_i}{C}$$

(2) 约束条件建立

各相位绿灯时间： $15 \leq g_i \leq 60$ ，（仅考虑机动车流）

$$\text{周期长： } C = \sum_{i=1}^n (g_i + l_i)$$

$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ ，通常， C_{\min} 取为 40s， C_{\max} 取为 150s。

(3) 目标函数的建立

由于通行能力与延误是一对矛盾的物理量，它们之间是一种相互联系、相互制约的关系。由于延误和通行能力之间权重关系不容易确定，不宜采用加权法；而该多目标函数的特点（通行能力和延误都是大于零的函数）更适合与乘除法的条件，所以本文采用乘除法，将多目标函数转化为单目标函数。经转化的目标函数如下：

$$f(C, g_1, g_2, \dots, g_n) = \frac{kQ}{D} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1000S_i g_i}{C}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i C (1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_i)} + \frac{q_i Q_0}{C} \right)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1000S_i g_i}{C}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i C (1 - \frac{g_i}{C})^2}{2(1 - y_i)} + \frac{q_i Q_0}{C} \right)}$$

所以，此问题可以描述成：

$$\begin{cases} \max f(C, g_1, g_2, \dots, g_n) = \frac{k \sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \\ \text{s.t. } 15 \leq g_i \leq 60 \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \end{cases}$$

其中， k 为调节系数。

由于一个周期内通行能力在数值小于交叉口总延误,为了便于计算结果的判断与分析,引入个调节系数,通过调整 k 值的大小,使通行能力在数值上大于延误,使计算结果更加直观。取 $k=1000$ 。从模型中可以看到当延误增长的幅度小于小通行能力增长时,函数至将会不断增大,逐渐趋近于最优解,反之就会远离最优解。

3.2 遗传算法介绍

遗传算法是一种有效地解决最优化问题的方法。它最先是由John Holland于1975年提出的,遗传算法是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算模型。它的思想源于生物遗传学和适者生存的自然规律,是具有“生存+检测”的迭代过程的搜索算法。遗传算法以一种群体中的所有个体为对象,并利用随机技术指导对一个被编码的参数空间进行高效搜索。其中,选择(selection)、交叉(crossover)和变异(mutation)构成了遗传算法的遗传操作;参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设计、遗传操作设计、控制参数设定等5个要素组成了遗传算法的核心内容^[20]。

遗传算法的基本步骤如下:

(1) 参数编码:遗传算法不能直接处理问题空间的参数,必须通过编码将参数表示成一个定长的字符串。一个字符串也称为一个个体或基因,常用的编码方式有二进制编码、实数编码等。

(2) 初始种群的生成:开始计算前随机地产生若干个体,这些个体构成一个群体,作为进化计算的初始代,称为初始群体。该群体代表一些可能解的集合。遗传算法的任务是从这些群体出发,模拟进化过程进行择优汰劣,最后得出优秀的群体和个体,满足优化的要求。

(3) 适应度函数的设计:遗传算法在搜索过程中一般不需要其它外部信息,只需依据适应度函数(fitness function)来控制种群的更新。根据适应度函数对群体中的每个个体计算其适应度,为群体进化的选择提供依据。设计适应度函数的主要方法是把问题的目标函数转换成合适的适应度函数。

(4) 选择:按一定概率从群体中选择数对个体,作为双亲用于繁殖后代,产生新的个体加入下一代群体。即适应于生存环境的优良个体将有更多繁殖后代的机会,从而使优良特性得以遗传。选择是遗传算法的关键,它体现了自然界中适者生存的思想。

(5) 交叉:在自然界生物进化过程中起核心作用的是生物遗传基因的重组。同样,遗传算法中起核心作用的是遗传操作的交叉算子。所谓交叉是指把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作。通过交叉,遗传算法的搜索能力得以飞跃提高。

(6) 变异:按一定的概率从群体中选择若干个个体。对于选中的个体,随机选择某

一位进行取反操作。变异模拟了生物进化过程中的偶然基因突变现象。

(7) 重复：对产生的新一代群体进行重新评价、选择、杂交和变异。如此循环往复，使群体中最优个体的适应度不断提高，直至最优个体的适应度达到某一界限或迭代次数超过预先设定值，算法结束。搜索能力主要是由选择和杂交赋予的，变异算子则保证了算法能搜索到问题解空间的每一点，从而使算法达到优化要求。

通过以上遗传算法的操作步骤可以看出，与传统的优化技术比较，遗传算法的特点在于：

- (1) 遗传算法是对问题参数的编码组进行计算，而不是直接针对参数本身；
- (2) 遗传算法的搜索是从问题解的编码组开始搜索，而不是从单个解开始；
- (3) 遗传算法使用目标函数值(适应度)这一信息进行搜索，而不需导数等其他信息；
- (4) 遗传算法使用的选择、交叉、变异这三个算子都是随机操作，而不是确定规则。

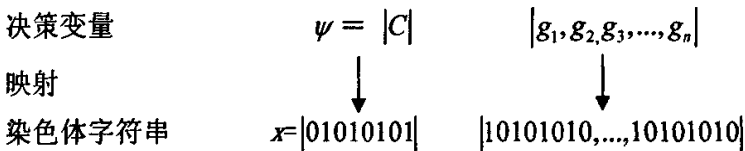
3.3 遗传算法求解配时模型的设计

本文在利用遗传算法求解配时模型的过程中，主要步骤如下：

(1) 变量编码^[21]：

信号配时的变量 $\psi = (C, g_1, \dots, g_n)$ 用二进制字符串 $x = (b_1, b_{l_0}, \dots, b_0)$ 表示。

编码的过程如下：



将二进制字符串 $(b_1, b_{l_0}, \dots, b_0)$ 转化为十进制数为：

$$(b_1, b_{l_0}, \dots, b_0)_2 = \left(\sum_{i=0}^{l_1} b_i 2^i \right)_{10} = \phi \quad , \quad i=1, 2, \dots, l_1$$

对每一个决策变量的值转化为具体的信号配时的变值：

$$\psi = \psi_{\min} + \phi \frac{\psi_{\max} - \psi_{\min}}{2^{l_1+1} - 1} \quad , \quad i=1, 2, \dots, l_1$$

(2) 适应度函数：

当 $0 < Y \leq 0.75$ 时，适应度函数 $F(x) = \frac{1}{f(C, g_1, g_2, \dots, g_n)}$

当 $0.75 < Y \leq 0.95$ 时, 适应度函数 $F(x) = f(C, g_1, g_2, \dots, g_n)$

(3) 遗传操作:

- ① 选择操作: 轮盘赌选择法
- ② 交叉操作: 二进制单点交叉
- ③ 变异操作: 二进制变异

在运行遗传算法程序时, 需要对一些参数作事先设置, 它们包括初始种群大小、染色体长度、交叉率、变异率、最大进化代数等, 这些参数的设置对遗传算法的性能都有很重要的影响。一般来说, 选择较大数目的初始种群可以同时处理更多的解, 因而容易找到最优解, 其缺点是增加了每次迭代的时间, 一般取20-100。交叉率的选择决定了交叉口操作的频率, 频率越高, 可以越快地收敛到最有希望的最优解区域, 因此一般选择比较大的交叉率, 但太高的频率也可能导致过早收敛, 一般取值0.4-0.9。变异率的选取一般受种群大小、染色体长度等因素影响, 通常选择很小的值, 一般取0.001-0.1。若选取高的变异率, 虽然增加样本模式的多样性, 但可能会引起不稳定。种群大小及染色体长度越大, 变异率选取越小。染色体长度主要决定于问题求解精度的要求, 精度越高, 染色体长度越长, 搜索空间越大, 相应地要求种群大小设置大一些。最大进化代数作为一种模糊终止条件, 一般视具体问题而定, 取100-500代。

本文将参数设置如下: 初始种群大小为70, 种群代数为100, 交叉率为0.6, 变异率为0.01, 染色体长度为32位。

3.4 本章小结

本章首先提出了一个满足交通需求的多目标的信号配时模型, 该模型能够根据交叉口交通状况的不同, 选择不同的性能指标。从而建立不同的配时模型, 制定配时方案。然后, 介绍了遗传算法的基本原理, 以及利用遗传算法求解该问题的主要参数的设计。

4 基于模糊控制的单交叉口控制方法的研究

传统的城市交通控制一般都采用最优控制，即通过建立城市交通的数学模型，再求解数学模型，从而得到红绿灯信号配时方案。但是由于交通系统的复杂性和随机性，难以用精确的数学模型来描述，所以要建立数学模型相当不易。对于难以建立被控对象精确数学模型的系统，虽然基于现代控制理论的控制方法可以解决一些问题，但范围是有限的，其控制效果往往不如一个有实践经验的操作人员的手动控制好。模糊数学的出现给交通控制带来了新的生气，由于模糊控制不需要建立系统模型，特别适用于随机性很强的、复杂的城市交通控制系统。

本章首先对模糊控制理论作一简介，然后论述单交叉口交通信号模糊控制系统的设计方法，最后介绍遗传算法的基本理论和基于遗传算法的模糊控制器的优化设计。

4.1 模糊控制理论简介

1965年，美国加州大学伯克莱分校的L.A.Zadeh教授发表了关于模糊集的开创性论文，从而奠定了模糊数学的基础。近40年来，模糊理论及其应用的发展非常迅速。目前，模糊理论已在自动控制、人工智能、图像识别、管理科学、气象预报等领域得到了广泛应用^[2,22]。

4.1.1 模糊控制的概念

模糊集合是模糊概念的一种描述。模糊概念大量地存在于人的观念之中。我们知道：人脑的重要特点之一就是能对模糊事物进行识别和判决。如何使计算机能够模拟人脑思维的模糊性特点，从而完成更复杂的任务，这正是模糊理论产生的直接背景。模糊集合试图用连续变量量测对象(元素)在某类集合中的隶属程度，而不像传统集合那样，只有“属于”或“不属于”两种状态。模糊集合的思想反映了现实世界所存在的客观不确定性和人们在认识中出现的不确定性，因此，模糊性描述了事物的不确定性。

模糊控制是模糊理论在控制领域中的应用，其核心是用语言描述的控制规则。人的手动控制策略是通过操作者的学习、试验以及长期经验积累而形成的，它可通过人的自然语言加以描述，如若炉温偏高，则减少燃料；若水槽液位偏低，则加大进水流量；若路口某方向车辆排队较长，则加长绿时等。显然，它属于一种语言控制。由于自然语言具有模糊性，故这种语言控制就称为模糊控制。

为了实现模糊控制，需要将操作者或专家的控制经验相关知识表示成语言变量描述的控制规则，然后用这些规则去控制系统，这就是模糊控制器。模糊控制器的工作过程如下：根据由精确量转化来的模糊输入信息，按照手动控制策略获得的语言控制规则进行

模糊推理，给出模糊输出判决，并再将其转化为精确量，馈送到被控对象。设计一个模糊控制器必须解决以下3个问题：

(1) 精确量的模糊化，把语言变量的语言值化为某个适当论域上的模糊子集。

(2) 模糊控制算法的设计，通过一组模糊条件语句构成模糊控制规则，并计算模糊控制规则决定的模糊关系。

(3) 输出信息的模糊判决，完成由模糊量到精确量的转化。

模糊控制器的方框图如图4.1所示。

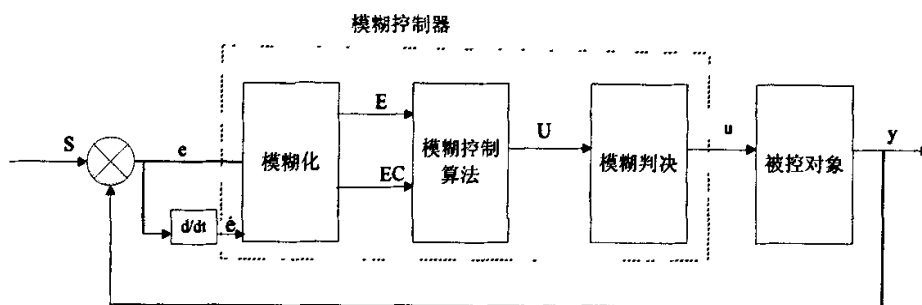


图4.1 模糊控制器方框图

Fig. 4.1 The diagram of Fuzzy Control

图4.1中， S 为设定值(精确量)； e ， \dot{e} 分别为系统误差与误差变化率(精确量)； E ， EC 分别为反映系统误差与误差变化的语言变量的模糊集； u 为模糊控制器输出的控制作用(精确量)； y 为系统输出(精确量)。必须指出：所谓模糊控制，只是在所采用的控制方法上应用了模糊理论，它所进行的完全是确定性的工作。实践表明，模糊控制具有以下几个特点：

- (1) 它不需要知道被控对象的数学模型。
- (2) 它易于实现对具有不确定性的对象和具有强非线性的对象进行控制。
- (3) 它对被控对象特性参数的变化具有较强的鲁棒性。
- (4) 它对控制系统的干扰具有较强的抑制能力。

4.1.2 实现模糊控制的具体步骤

- (1) 确定模糊控制器的输入变量和输出变量；
- (2) 设计模糊控制器的控制规则；
- (3) 确定模糊化和解模糊的方法；
- (4) 选择模糊控制器的输入变量及输出变量的论域，并确定模糊控制器的参数；

- (5) 编制模糊控制算法的应用程序;
 - (6) 合理选择模糊控制算法的采样时间;
- 具体步骤如下:

(1) 模糊化

模糊化的过程主要完成两个功能:

在采用合成推理算法时,为了在实时控制中避免模糊关系矩阵合成运算所浪费的计算机时间,总是采取在离线状态下将全部输入输出之间关系计算出来,形成一张控制表存入计算机内存中,在某一个采样时刻根据输入变量直接去查控制表就可以得到输出响应。控制表是以整数表示输入量和控制量的。为了能够生成控制表在合成推理方法中,要求必须将变量具有清晰性的基本论域转换成模糊论域。

① 论域变换

输入变量的真实论域在模糊控制器中必须变换到其内部论域。若内部论域是离散的,则其论域为 $\{0, \pm \text{整数}\}$,若内部论域是连续的,则其论域为 $[-1,1]$ 。论域变换相当于在真实论域上乘以比例因子变为内部论域。

② 模糊化

经过论域变换后的输入变量仍为普通变量,应为它们分别定义若干个模糊集合,并在其内部论域上规定各个模糊集合的隶属函数。再根据隶属函数的定义可以求出输入变量对各模糊集合的隶属度,这样就把普通变量的值变成了模糊变量的值,完成了模糊化的工作。输入变量的值在内部论域时是普通数值,经过模糊化以后变为 $[0,1]$ 区间内的隶属度。

(2) 知识库

知识库是模糊控制器的核心,存储着模糊控制器的一切知识。它包括数据库和规则库两部分。

① 数据库

数据库中存储着有关模糊化、模糊推理、解模糊的一切知识。

② 规则库

规则库中存储着模糊控制规则。模糊控制规则是在控制过程中将操作人的经验去粗取精、去伪存真,总结成若干条用自然语言描述的控制规则,利用模糊数学这一工具进行处理,构成模糊关系存放在计算机的存储器中,形成“规则库”。模糊控制规则是以“IF...THEN...”形式表示的模糊条件语句。规则库中所有的规则都是并列的。

(3) 模糊推理(模糊决策)

仿照人脑的模糊推理过程,在模糊自动控制中也有一个推理法则,以便于在有实时

输入时做出模糊决策。常用的模糊推理方法有两种即广义前向推理和广义反向推理。模糊控制规则采用“IF...THEN...”形式,IF部分是规则的前提,THEN部分是规则的结论。若已知规则的前提求结论,是广义前向推理。若已知规则的结论求前提,则是广义反向推理。模糊推理一般采用广义前向推理方法。

(4) 解模糊(模糊判决)

解模糊的过程是模糊化的反过程,它是在模糊推理结果的基础上产生输出控制量的数值。解模糊的过程主要完成以下两项工作:

① 解模糊

被控对象只能接受一个精确的控制量,因此必须从决策值模糊集中判决出一个确切的清晰量。解模糊的过程就是将模糊推理得到的模糊集合映射到输出量的普通集合的过程,即是从一个模糊量变为清晰量的过程。解模糊的方法有最大隶属度法、面积法、加权平均法及重心法。

② 论域反变换

将解模糊后得到的内部论域变换到控制量的真实论域上,直接对被控对象实施控制操作。

从以上对模糊控制器的介绍,不难看出,模糊控制器完成的是一种仿人工智能工作,所以模糊控制系统也是一种智能控制系统。而这种智能控制是以模糊数学作为理论基础的,这是模糊控制与其它智能控制所不同的地方。

4.2 模糊控制与城市交通控制的结合

城市交通系统是一种非线性的、时变的、滞后的大系统,传统的控制方法(如最优控制、自适应控制)都要首先建立交通流的数学模型,在此基础上推导出某种控制算法。由于城市交通系统的复杂性和随机性,建立的数学模型一般难以准确地描述城市交通的实际状况,而且算法复杂,在线估算量大,控制实时性差,控制精度也不高。

模糊控制不需要建立被控制对象的精确数学模型,它吸收了人工控制时的经验,能模仿人脑的逻辑推理和决策过程,不但使得控制过程简化,而且能满足实时性和控制精度的要求。所以,特别适用于具有较大随机性城市交通系统的控制。

4.2.1 单交叉口的交通信号模糊控制

1976年Pappis等人开展了将模糊控制引入交通控制领域的工作,在对理想平面交叉口的仿真中表明此种控制算法比传统的控制算法减少车辆延误7%左右^[23]。1997年Niittymaki和Jarkko与芬兰开发了FUSICO,即一个控制两相位孤立交叉口的模糊逻辑交通信号控制机。并与1999年,进行了现场测试,试验结果表明,与感应控制相比,延

误降低了 10%-20%。

1992年,我国徐东玲等学者也提出了基于感应控制思路的单路口模糊神经网络控制方案,仿真结果也较为理想^[24]。1998年,我国陈森发等学者提出了关键车流和非关键车流的概念,分析了非关键车流对控制效果的影响,在此基础上对Pappis算法进行了修正,仿真结果优于Pappis方案^[25,26]。

以上所述的模糊控制方案是对单交叉路口的两相位控制,适用于十字路口车辆构成中左拐车辆比例较小的情况。实践证明,当左拐车辆比例大于30%时,就应实行多相位控制。

本章对单交叉口多相位模糊交通控制进行了研究。

4.2.2 单交叉口描述及交通流建模

交叉口是城市交通基础设施的最基本的组成部分,尽管由于城市地理环境的不同,交叉路口的形状有差异,但总体上可以用十字路口进行描述,如图 4.2 所示。其他的丁字路口或者更多进路口的路口在方法上与十字路口信号控制的方法相近。

单路口多相位是指用多个交通流状态描述一个单路口所有的交通流状态。现在城市中最常用的就是四相位定周期控制策略,它可以较充分的描述路口各种交通流状态,同时这种四相位控制模式也是现在研究最多的一种控制模式。本章就是对这种四相位的交叉口进行研究。

东、南、西、北四个方向,每个方向均有右行,直行和左行三个车道车流。在每个车道都有两个感应线圈:上游线圈和停车线线圈。停车线线圈设置在本车道停车线内侧,用于检测该道的车辆离开数;上游线圈设置在距停车线线圈为 $M \times L$ 处,其中 M 为系统在该车道需要检测的最大车辆数, L 为每辆车停车时所占的平均长度。线圈尺寸的设置以在车道两边不留下一辆整车通过的孔隙为准。上游线圈用于检测车辆到达数。检测器对路口各个车道车流进行实时检测而获取车流量信息,为控制系统提供必要的数

据。本文以四相位双向左转为例介绍模糊控制器,东西直行、东西左转、南北直行、南北左转顺序执行,如图4.3所示。

首先,交叉路口的交通流模型服从以下四个假设:

- (1) 到达交叉口各个方向上的交通流是随机的;
- (2) 对每个相位而言,整个周期信号时间分为“有效红灯时间”、“有效绿灯时间”和“黄灯时间”;
- (3) 设红灯转变为绿灯后,车辆以恒定的速率 α pcu/s (小于等于饱和量) 离开等候车队通过交叉口;

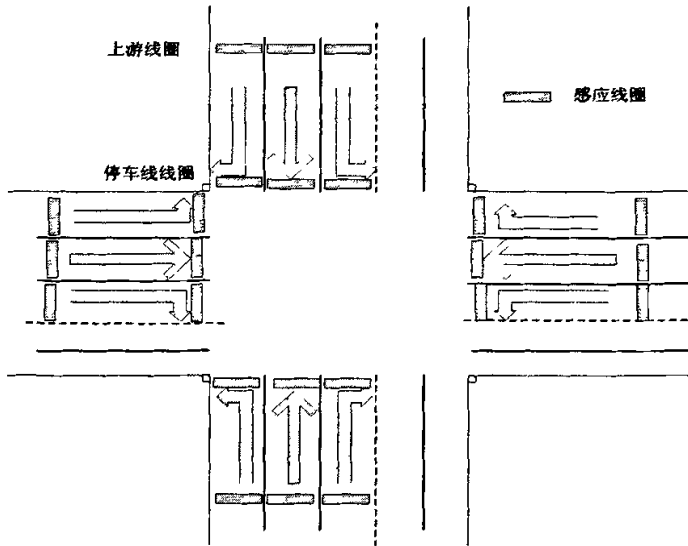


图 4.2 交叉口示意图

Fig. 4.2 The diagram of intersection

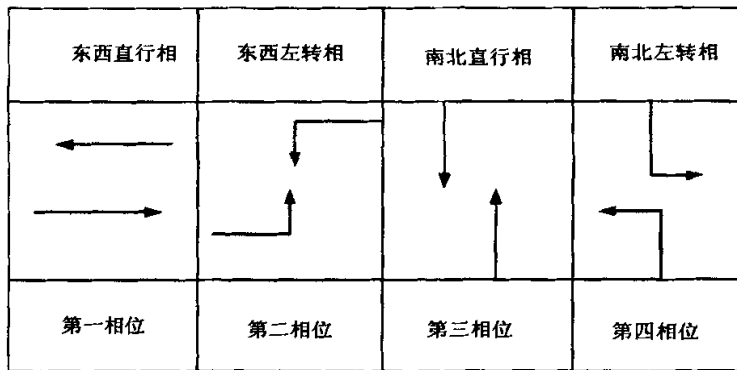


图 4.3 四相位车流示意图

Fig. 4.3 The diagram of four-phase vehicle flow

(4) 设到达的车辆为:

$$q_m = \begin{cases} b, & \text{如果在第 } m \text{ 秒内有 } b(a > b > 0) \text{ pcu 到达} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

设 Q_G' 为红灯相位在前绿灯期间内第 i 车道上没驶完的车辆数, $S_{k,R}$ 为红灯相位开始后第 k 秒时的等待车辆数, 定义为:

$$S_{k,R} = \sum_{i=1}^{l_R} (Q_G^i + \sum_{m=1}^k q_m^i)$$

其中, l_R 为红灯相位所属的车道数。

则该红灯相位车辆总延误为:

$$D_{n,R} = \sum_{k=1}^n S_{k,R} \quad (4.1)$$

其中, n 为该周期内红灯时间。

设 Q_R^i 为绿灯相位在前有效红灯和黄灯期间内所属车道 i 上等待的车辆数, $S_{k,G}$ 为该相位有效绿灯开始后第 k 秒时的等待车辆数, 定义为:

$$S_{k,G} = \sum_{i=1}^{l_G} [C_k^i (Q_R^i + \sum_{m=1}^k (q_m^i - k \times a))]$$

其中 l_G 为绿灯相位所属的车道数, C_k^i 定义为:

$$C_k^i = \begin{cases} 1, (Q_R^i + \sum_{m=1}^k (q_m^i - k \times a)) > 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

则该绿灯相位车辆总延误为:

$$D_{n,G} = \sum_{k=1}^n S_{k,G} \quad (4.2)$$

其中, n 为该周期内绿灯时间。

由式(4.1)和式(4.2)计算信号周期 j 内单交叉口车辆总延误

$$D_j = D_R^j + D_G^j$$

在 w 个信号周期内, 单交叉口的车辆总延误 D 为:

$$D = \sum_{j=1}^w D_j$$

最后可得 w 个信号周期内每辆车的平均延误 d 为

$$d = \frac{D}{A}$$

其中, A 为 w 个信号周期内各车道上到达的车辆数。

4.3 传统模糊控制方法的研究

4.3.1 传统模糊控制方法的原理

本文实现了一种平面交叉路口的模糊控制方案, 它模拟了交警在指挥交通时的经验, 即在对某相位放行时, 是否再给此相位绿灯延时, 取决于此相位排队长度和下一个相位排队长度的比较。当当前相位的排队长度大于下一相位的排队长度, 则应延长绿灯时间; 反之, 则立即跳转到下一个相位。其控制目标是: 寻找最佳信号周期和确定两交叉方向的红绿灯信号配时(即绿灯延长时间 t), 使通过路口的车辆平均延误尽可能小, 通行能力尽可能大^[27-29]。

Step1: 从相位 i 开始, 指定各个相位的最小绿灯时间 G_{\min} 和最大绿灯时间 G_{\max} ;

Step2: 先给相位 i 以最短绿灯时间 $t = \Delta t = G_{\min}$;

Step3: 测得在 Δt 时间内相位 i 通行车道上的车队长及下一个相位通行车道上车队长, 分别设为 p_i, p_{i+1} ;

Step4: 若 p_i 为 0, 或 $p_i \leq r$ (某一大于 0 的整数)且 p_{i+1} 大于某一给定值 $m(m \geq 0)$, 或累积绿灯时间 $t = G_{\max}$, 则将绿灯转到下一个相位, 回到步骤 2, 否则, 继续。

Step5: 根据 p_i, p_{i+1} 的值的大小来确定绿灯延长时间 Δt , 这可以根据交警的经验和交叉口的几何形状建立模糊控制规则。若 $t + \Delta t \geq G_{\max}$, 则 $\Delta t = G_{\max} - t$; 否则 $t = t + \Delta t$; 回到步骤 3。

算法中的队长是用交叉口停止线前相隔一定距离(通常为 80m 至 100m)的两检测器之间的车辆数来描述的。

4.3.2 传统模糊控制器的设计

(1) 模糊控制器结构

模糊控制器的输入: 当前相位的队列长度 qg , 后继相位的队列长度 qr 。

模糊控制器的输出: 当前相位的绿灯延长时间 t 。

该模糊控制器的结构, 如图 4.4 所示。

(2) 确定各输入、输出变量及其自然值的变化范围

两检测器之间的车辆数 qg, qr 为考虑具体交叉口路况, 两交叉口之间的实际距离, 交叉口是否处于交通主干道等因素后, 折算成标准小客车单位(pcu)作为单位的车辆数。

① 输入变量为 qg, qr , 其变化范围为 0—30pcu;

② 输出变量为 t ，其变化范围为 0—45s。

(3) 确定各输入、输出变量对应语言变量的论域元素及量化因子
根据输入量的自然值变化范围和输入量的论域范围关系可得：

$$qg、qr \text{ 的量化因子为: } K_1 = \frac{qg \text{ 的论域范围}}{qg \text{ 的自然值变化范围}} = \frac{12}{30} = 0.4$$

$$t \text{ 的量化因子为: } K_2 = \frac{t \text{ 的自然变化范围}}{t \text{ 的论域范围}} = \frac{45}{15} = 3$$

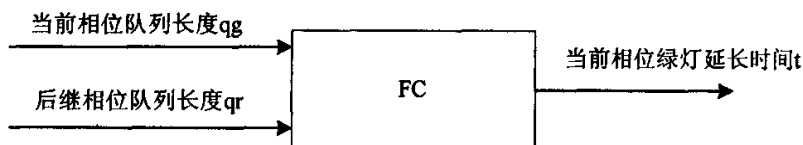


图 4.4 模糊控制器示意图

Fig. 4.4 The block diagram of Fuzzy Controller

(4) 输入输出语言变量的论域及隶属度函数

输入变量 qg 、 qr 的论域：{0,1,2,3,...12}

模糊子集为七个，其语言值分别为{VF,F,LF,C,LM,M,VM}，分别是(很少，少，较少，中，较多，多，很多)

根据经验， qg 、 qr 的隶属函数如表 4.1 表述。

输出变量 t 的论域：{0,1,2,3,...15}

模糊子集为七个，其语言值分别为{VS,S,LS,C,LL,L,VL}，分别是(很短，短，较短，中，较长，长，很长)

根据经验， t 的隶属函数如表 4.2 表述。

(3) 模糊控制规则

模糊规则是模糊系统的核心部分，系统其他部分的功能在于解释和利用这些模糊规则来解决具体问题。模糊规则一般来源于实际，通过总结专家经验，建立模糊控制规则表，规则的质量对控制品质的优劣起着关键性作用。模糊决策采用 Mamadani's(min-max) 决策法。本课题将输入变量 qg 和 qr 划分为 7 级，可形成 $7*7=49$ 条规则，如表 4.3 表述。

(4) 解模糊

解模糊的输入是模糊集合，输出是一个数值。由于经过模糊推理后得到的是输出变量的一个范围上的隶属度函数，因此，必须进行解模糊以将输出变为确定的值。本文采

用重心法进行清晰化，将模糊量转换为清晰的数字量输出。

表 4.1 qg 、 qr 的隶属度函数
Tab. 4.1 The fuzzy sets of qg and qr

qg 模糊集	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VF	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
LF	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0
LM	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1
VM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1

表 4.2 t 的隶属度函数
Tab. 4.2 The fuzzy sets of t

t 模糊集	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VS	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LS	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0
LL	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1	0.5	0.1	0
VL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1

设 t_i 的隶属度函数为 $\mu(t_i)$ ，则绿延长的精确量由下式决定：

$$t' = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(t_i)t_i}{\sum_{i=1}^n \mu(t_i)}$$

表 4.3 模糊推理规则
Tab. 4.3 The fuzzy reasoning rules

		qg							
		VF	F	LF	C	LM	M	VM	
qr	t	VF	VS	S	LS	C	LL	L	VL
	F	VS	S	LS	C	LL	L	VL	
	LF	VS	S	LS	C	LL	L	L	
	C	VS	S	LS	C	C	LL	L	
	LM	VS	S	LS	C	C	LL	LL	
	M	VS	S	S	LS	LS	C	LL	
	VM	VS	VS	S	S	LS	LS	C	

4.3.3 传统模糊控制器的实现

(1) MATLAB 介绍

MATLAB 是 MathWorks 公司推出的一套高性能的数值计算和可视化软件。它集数值计算、矩阵分析、信号处理、图形显示和 M 语言编程于一体，构成了一个方便的、友好的用户界面。

本文选择 MATLAB，主要是因为 MATLAB 提供了模糊控制工具箱。该模糊工具箱有 5 个主要的 GUI 工具可以用来建立、编辑和观察模糊推理系统：模糊推理系统编辑器 Fuzzy、隶属函数编辑器 Mfedit、模糊规则编辑器 Ruleedit、模糊规则观察器 Ruleview、模糊推理输入输出曲面视图 Surfview。

下面分别说明：

模糊推理系统编辑器用来处理系统的最顶层的构建问题，例如输入输出变量的数目、变量名和去模糊化方法等。

隶属函数编辑器用于定义与每个变量关联的隶属函数的形状，模糊规则编辑器用于编辑规则列表，该规则列表定义了系统的行为。

模糊规则观察器和输出曲面观察器用于观察模糊推理系统^[30]。

(2) 传统模糊控制器的隶属度函数及输出曲面的实现

根据上节中对输入变量 qg 、 qr 以及输出变量 t 的隶属度函数的设计，采用 MATLAB 对其进行实现。如图 4.5 所示。

则得出的模糊推理输入、输出关系曲面如图 4.6 所示。

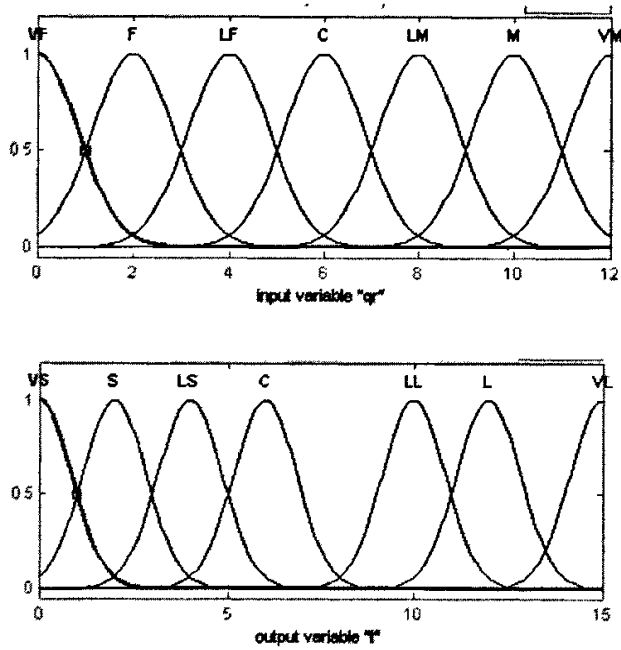


图 4.5 输入、输出变量的隶属度函数

Fig. 4.5 The fuzzy sets of qg and t

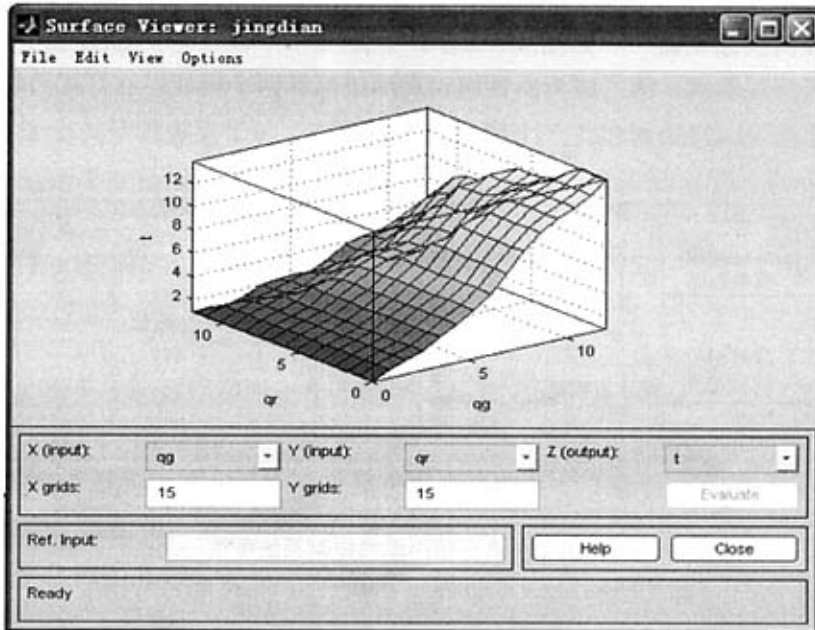


图 4.6 模糊控制器的输出曲面

Fig. 4.6 Surfview of the fuzzy controller

4.4 可变相序模糊控制方法的研究

4.4.1 传统模糊控制方法存在的问题

在上面的传统模糊控制器中，相序是固定的，只能调整绿灯的时间。所以，比较适合交叉口各个相位的交通流分布比较均衡的情况。对于交叉口的各个相位流量差别很大的交叉口，可能出现一个相位出现空放现象，而其他相位由于长时间得不到通行权，出现拥挤或堵塞。因此，有必要对可变相序的模糊控制进行研究。

4.4.2 可变相序模糊控制方法的原理

本文实现的可变相序的模糊控制器能够根据交通检测器提供的信息，选择通行的相位，当某一相位被选中后，控制器将赋予其通行权并给予此相位最小绿灯时间，以后每隔2s，控制器重新采集一次信息并做出决定是延长绿灯时间还是进行相位切换。相位最小绿灯时间的引入是为了确保此相位已过停车线而来不及通过路口的车辆的交通安全，也是在某相位车流很稀的情况下给予行人和非机动车一些过街时间。这里路口直行相位的最短绿灯时间定为15s，左转相位定为17s而且每一相车辆连续等待的时间不能过长，这里定为120s，否则驾驶员从心里上不能忍受。

4.4.3 可变相序模糊控制器的设计与实现

该两级模糊控制器^[31-37]如图 4.7 所示。

第一级为观测级，第二级为决策级。观测级包括两个模块：红灯相位选择模块和绿灯相位观察模块。决策级包含一个模块：决策模块。每个模块都是一个子模糊控制器。

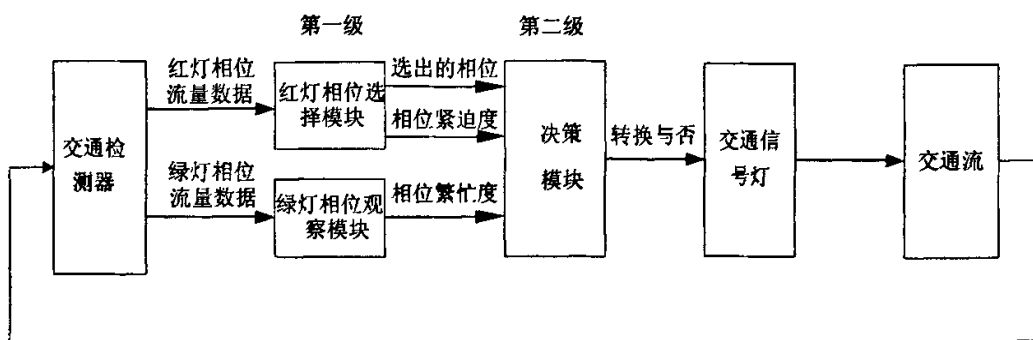


图 4.7 可变相序模糊控制系统框图

Fig. 4.7 The block diagram of changeable phase fuzzy system

红灯相位选择模块根据车辆检测器检测到的交通信息判断除当前绿灯方向外所有

红灯相位的交通状况，计算各红灯相位等待绿灯的紧迫度，并确定出对绿灯要求最为紧迫的红灯相位作为下一个绿灯相位的候选相位。将该相位和它的相位紧迫度传送给决策模块。

绿灯相位观察模块根据车辆检测器检测到的交通信息判断当前绿灯方向交通状况，确定绿灯相位繁忙度，也将其传送给决策模块；决策模块根据第一级两个模块的输出比较红灯相位等待绿灯的紧迫度和绿灯相位的繁忙度，决定是切换相位还是延长当前绿灯时间。如果由红灯相位选择模块选出的相位紧迫度比由绿灯相位观察模块观察的绿灯相位繁忙度高，那么决策模块将进行绿灯相位的切换，否则继续延长当前绿灯时间。

下面分别详细介绍这三个模块。

(1) 红灯相位选择模块

这个模块的输入是除了绿灯相位之外的所有红灯相位排队长度，输出是被选出的相位(P_r)和它的相位紧迫度(U_r)。 U_r 描述了本相位的综合交通状况。为了选出一个紧迫度最高的相位，需要计算所有输入相位的相位紧迫度，进行比较并从中选出相位紧迫度最高的相位作为候选相位。如果一个相位包含多于一个交通流，那么需要通过模糊推理分别计算各交通流的紧迫度，然后将它们的平均值作为整个相位的相位紧迫度。

下面详细说明此模块的设计：

① 模糊推理的输入输出变量

输入变量： qr 和 tr

输出变量： U_r

qr 是一个车道两检测器之间的车辆数， tr 是一个车流方向自上次绿灯结束以来红灯持续的时间。这两个变量反映了当前的交通状况。 U_r 是交通流紧迫度，它反映了一个交通流的交通状况。

qr 的计算方法如下：

$$qr = qr0 + c$$

其中， $qr0$ 为上次绿灯结束时一个车道两检测器之间的车辆数； c 为红灯期间一个车道的车辆到达数。

② 输入输出变量的论域、模糊语言及隶属度函数

qr 的自然变化范围 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots, 30\}$

tr 的自然变化范围 $(0, 120)$

U_r 的自然变化范围 $(0, 6)$

qr 的论域 $\{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30\}$ ；

tr 的论域{0,12,24,36,48,60,72,84,96,108,120};

比例因子均取为 10

Ur 的论域{0,1,2,3,4,5,6};

qr ={很少, 少, 中等, 多, 很多};

tr ={很短, 短, 中等, 长, 很长};

Ur ={很低, 低, 中等, 高, 很高}。

采用 MATLAB 设计此隶属度函数, 如图 4.8 所示。

③ 模糊规则

确定模糊控制规则的原则是: 当车道上已到达的车辆数增多或红灯持续时间增长时车流的紧迫度要相应的增高。通过总结实践和专家经验, 建立了模糊控制规则, 共 25 条, 如表 4.4 表述。

表 4.4 红灯相位选择模块的所有规则
Tab. 4.4 All rules of the next phase module

qr tr	很少	少	中等	多	很多
很少	很低	很低	很低	低	中等
少	很低	很低	低	中等	高
中等	低	中等	中等	高	很高
多	中等	高	高	很高	很高
很多	很高	很高	很高	很高	很高

(2) 绿灯相位观察模块

这个模块以绿灯相位队列长度作为输入, 产生的绿灯相位繁忙度(Bt)作为输出。绿灯交通流数据选择绿灯相位剩余车辆数(qg)和绿灯相位时间(tg)(如果绿灯相位包含多于一个交通流, 那么使用各交通流的最大剩余车辆数, 绿灯延长时间是相同的)

下面详细说明此模块的设计:

① 数据处理

$$qg = qg_0 + c - g \quad (4.3)$$

式中: qg 为绿灯相位开始时车道上两检测器之间的车辆数; c 为绿灯期间一个车道的车辆到达数; g 为此绿灯相位开始后的车辆离去数。

② 模糊推理的输入输出变量

输入变量: qg 和 tg

输出变量： Bt

qg 是由式(4.3)算出的绿灯相位最大剩余车辆数。 tg 是绿灯相位的时间。这两个量给出了当前绿灯相位的交通状况。 Bt 反映了当前绿灯相位的繁忙程度。

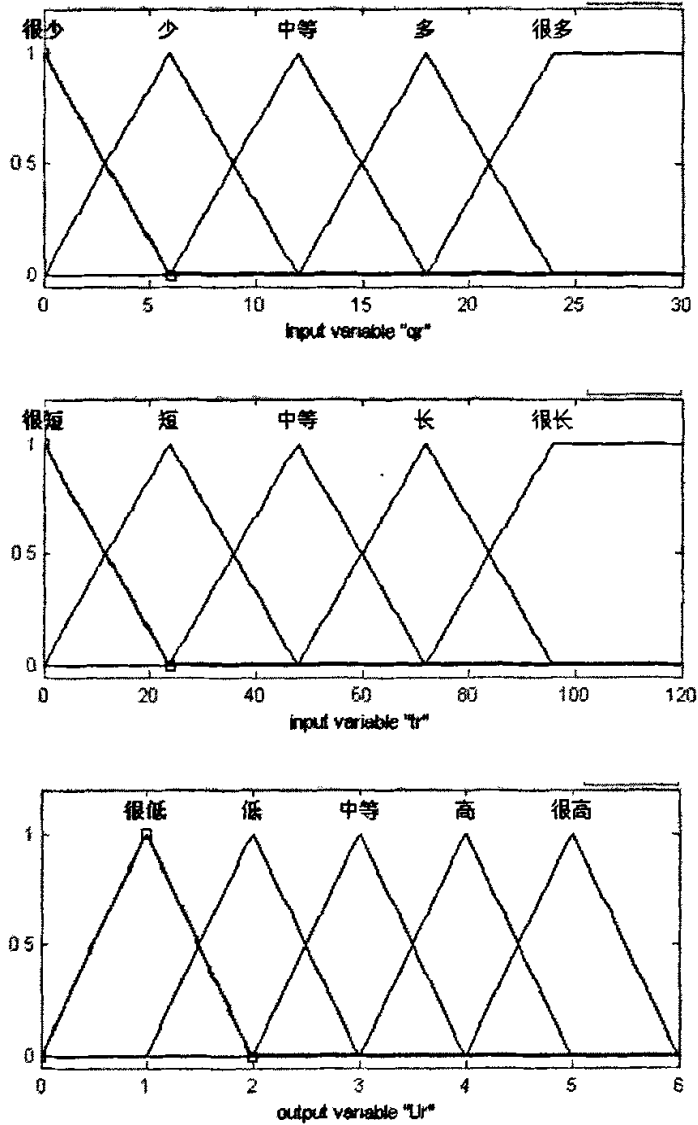


图 4.8 qg 、 qr 和 Ur 的隶属度函数

Fig.4.8 The fuzzy sets of qg 、 qr and Ur

③ 输入输出变量的论域、模糊语言及隶属度函数

qg 的基本论域{0,1,2,3,4,5..... 30};

tg 的基本论域(0,30);

Bt 的基本论域(0,4);

qg 的论域{0,5,10,15,20,25,30};

tg 的论域{0,5,10,15,20,25,30};

Bt 的论域{0,1,2,3,4};

qg ={很少, 少, 多};

tg ={很短, 短, 长};

Bt ={低, 中等, 高}。

隶属度函数如图 4.9 所示。

表 4.5 绿灯相位观察模块的所有规则
Tab. 4.5 All rules of the observation module

qg	很少	少	多
很短	低	中等	高
短	低	中等	高
长	低	低	中等

④ 模糊规则

确定模糊控制规则的原则是：如果一个交通流的绿灯时间增长或剩余车辆数减少，那么繁忙度将降低。通过总结实践和专家经验，建立了模糊控制规则，共 9 条，如表 4.5 表述。

(3) 决策模块

它的输入是候选相位(Pr)，相位紧迫度(Ur)和繁忙度(Bt)，输出是决策(Dc)。 Pr 是由红灯相位选择模块选出的相位， Ur 是此相位的相位紧迫度。 Bt 是绿灯相位观测模块输出的绿灯相位繁忙度。 Dc 决定是否将通行权付给候选相位(Pr)。但是 Pr 不参与模糊推理。这个模块将模糊推理的结果去模糊化。如果去模糊化值比规定的阈值大则转换当前绿灯信号到候选相位(Pr)。

下面详细说明此模块的设计：

① 模糊推理的输入输出变量

输入变量： Ur 和 Bt

输出变量： Dc

U_r 是由红灯相位选择模块选出最紧迫相位的相位紧迫度。 B_t 是绿灯相位观测模块输出的绿灯相位的繁忙度。 D_c 反映了是否转换当前绿灯相位的决策程度。

② 输入输出变量的论域、模糊语言及隶属度函数

U_r 的基本论域(0,6);

B_t 的基本论域(0,4);

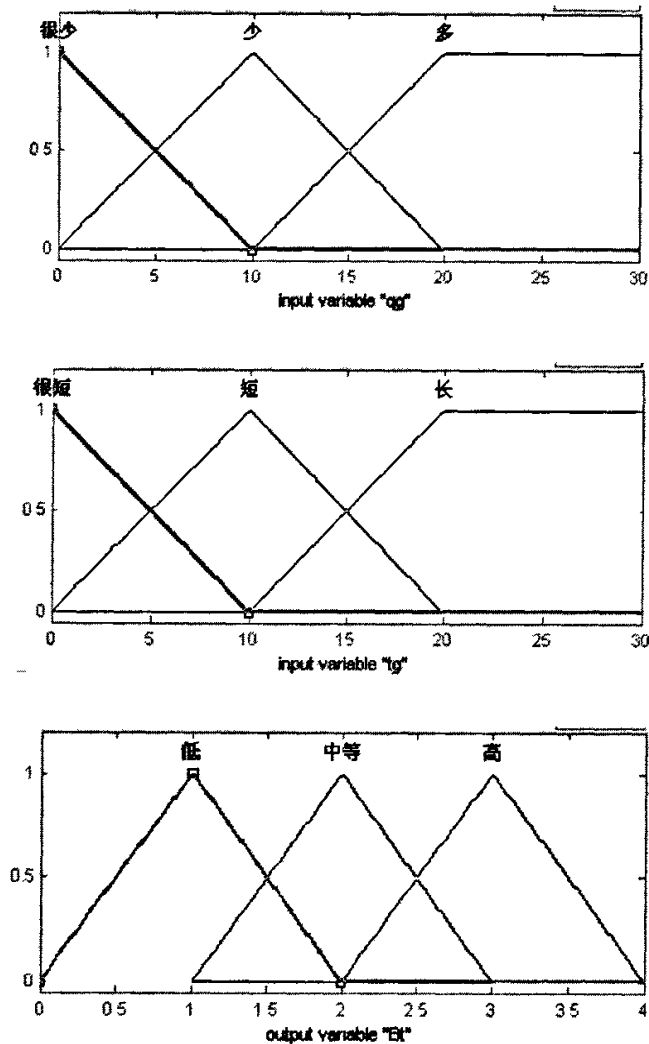


图 4.9 qg 、 tg 和 B_t 的隶属度函数

Fig. 4.9 The fuzzy sets of qg 、 tg and B_t

D_c 的基本论域(0,3);

U_r 的论域{0,1,2,3,4,5,6};

B_t 的论域{0,1,2,3,4};

D_c 的论域{0,1,2,3};

U_r ={很低, 低, 中等, 高, 很高};

B_t ={低, 中等, 高};

D_c ={不, 是}。

图 4.10 给出了决策 D_c 的模糊隶属度函数。相位紧迫度 U_p 和繁忙度 B_t 的模糊隶属度函数与相位选择模块的紧迫度 U_r 和观察模块的繁忙度 B_t 分别相同。

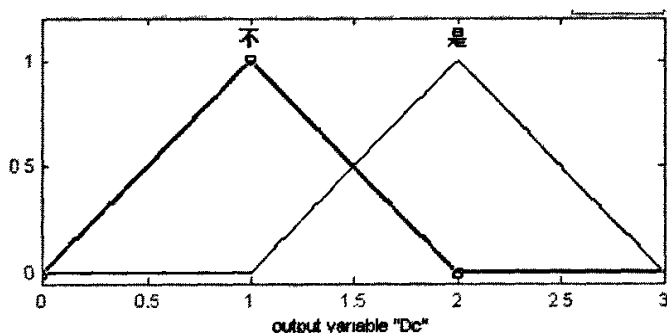


图 4.10 D_c 的隶属度函数

Fig. 4.10 The fuzzy sets of D_c

③ 模糊规则

确定模糊控制规则的原则是：如果候选相位的紧迫度高或当前绿灯相位的繁忙度低，那么这个模块将停止当前绿灯相位并给候选相位一个绿灯信号。通过总结实践和专家经验，建立了模糊控制规则，共 15 条，如表 4.6 表述。

表 4.6 决策模块的所有规则
Tab. 4.6 All rules of the decision module

U_r	很低	低	中等	高	很高
B_t					
低	不	不	是	是	是
中等	不	不	不	是	是
高	不	不	不	不	是

则得出的模糊推理输入、输出关系曲面如图 4.11 所示。

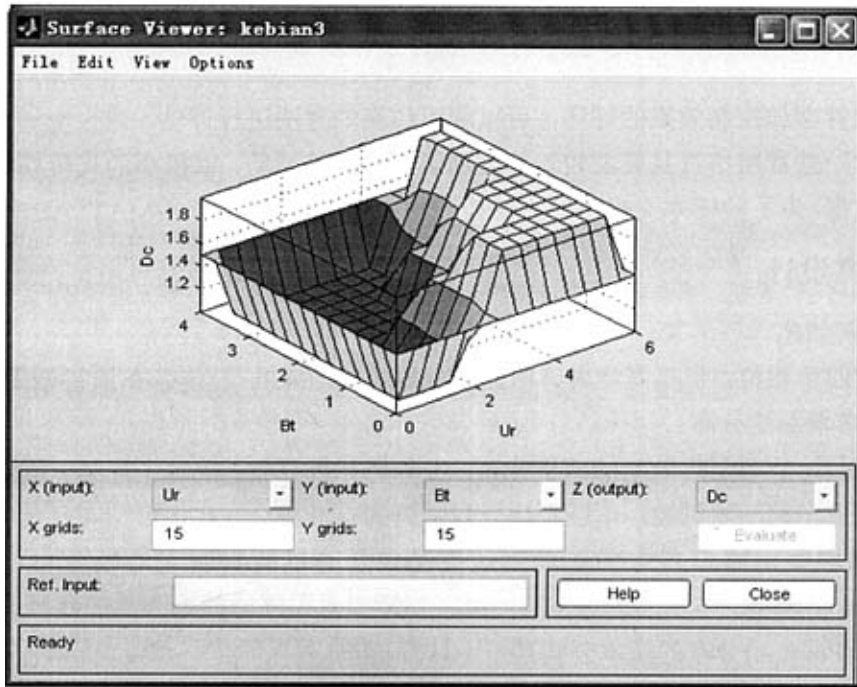


图 4.11 模糊控制器的输出曲面
Fig. 4.11 Surfview of the fuzzy controller

4.5 本章小结

本章首先介绍了模糊控制理论、特点以及模糊控制与城市交通控制的结合应用。然后，设计实现了传统的模糊控制器。针对交通流变化比较大的交叉口，本文设计与实现了一种可变相序的模糊控制器。

5 仿真实验

交通管理和控制效果的好坏,可以利用仿真的方法进行评估,通过交通仿真,可以避免进行一些费用昂贵且周期较长的交通调查和现场试验,以很小的代价获得难以调查的大量数据。为了验证本文提出的方法控制结果的好坏,本文采用MATLAB进行了仿真。

5.1 仿真设计

(1) 初始化

设定四个相位,仿真开始时,相位1为绿灯,如图4.3。设定各车道初始车辆数为10。

(2) 车辆到达分布

车辆到达分布是离散型的随机分布,又称之计数分布,反映了在某一固定时段内到达给定地点车辆的随机数。车辆到达分布常见的有泊松分布、二项分布、负二项分布三种。本课题假定路口各方向车辆到达交叉口是随机的且服从泊松分布,到达率为0-0.4pcu/s。

泊松(Poisson)分布的基本公式是:

$$p(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}, \quad x=0,1,2,\dots$$

式中, $p(x)$ 为在计数间隔 t 内到达 x 辆车的概率; λ 为单位时间的平均到达率(pcu/s); t 为每个计数间隔的持续时间(s); e 为自然对数的底,取值为 2.71828。

若令 $m = \lambda t$, m 在计数时间 t 内平均到达的车辆数,则(4.13)式可写为:

$$p(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$$

课题利用MATLAB中的随机函数(random)产生各个车道上的初始排队车辆数和计数时间到达的车辆数。通过设定不同的到达率值实现不同的交通情况^[29]。

(3) 驶离率

设某车流红灯转变为绿灯后车辆以固定的驶离率(0.5pcu/s)离开等候的车队。

(4) 建立模糊推理系统

本仿真采用模糊逻辑工具箱中的Mamdani型推理系统实现模糊推理,“与”运算采用极小运算,“或”运算采用极大运算,模糊蕴涵采用极小运算,模糊规则综合采用极大运算,去模糊化采用重心法^[38]。控制器的具体设计如上节所述。

作为对比, 本文亦在相同的交通条件下编写了定时控制仿真程序, 配时参数由韦伯斯特配时公式得出。

5.2 仿真结果

(1) 基于遗传算法优化的方法与定时控制比较

本文采用 MATLAB 中的遗传算法工具箱进行仿真设计。

设单交叉口各相位最小绿灯时间为 15s, 最大绿灯时间为 45s, 取平均到达率分别 0.175, 0.185, 0.200, 0.25, 0.300(pcu/s) 几种情况时进行仿真, 驶离率为 0.5(pcu/s)。饱和流量为 1200pcu/s。则该方法与定时控制进行对比如图 5.1, 5.2 所示。

仿真结果表明, 低流量比条件下, 本文的方法与定时控制相比, 平均延误降低了 8%。在高流量比条件下, 本文的方法与定时控制相比, 延误增加了 2%, 通行能力增加了 5%。这是因为, 在高流量比期间, 以通行能力为主要的优化目标, 虽然牺牲了一些延误, 但增加了整个交叉口的通行能力。

(2) 传统模糊控制和定时控制仿真比较

单交叉口模糊控制算法的仿真流程图如图5.3所示。

在相同条件下, 将模糊控制与定时控制进行仿真, 仿真结果对比如图5.4所示。

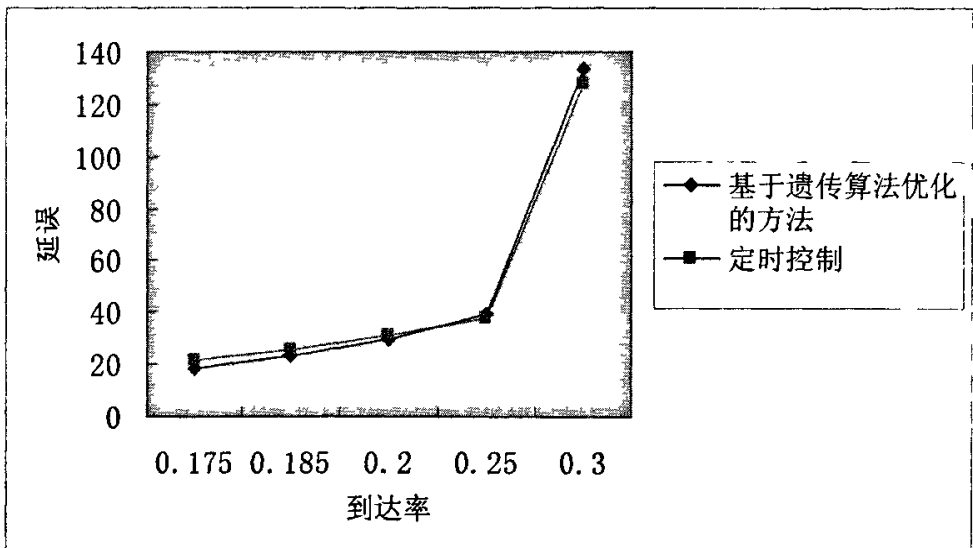


图 5.1 基于遗传算法优化的方法与定时控制延误比较

Fig. 5.1 Comparison between delays caused by GA optimization-based method and fixed-time

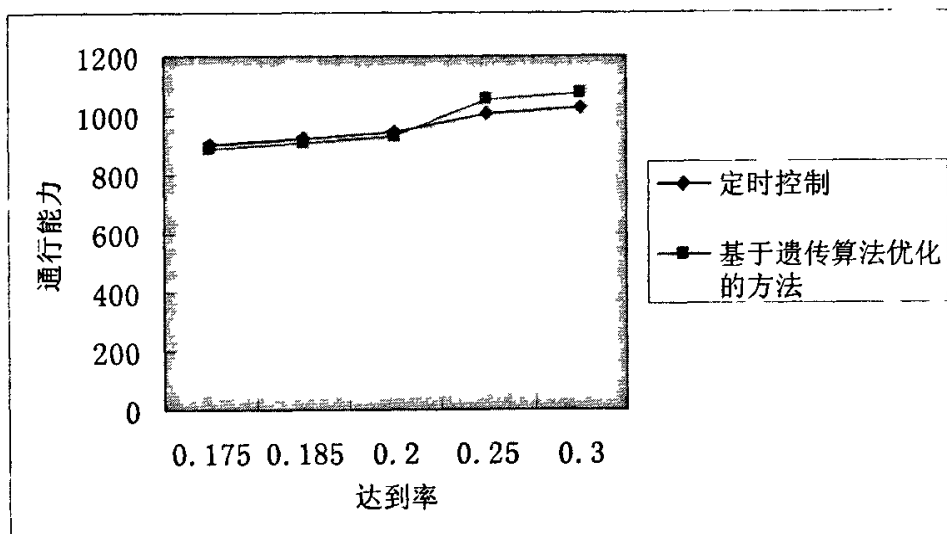


图 5.2 基于遗传算法优化的方法与定时控制通行能力比较

Fig. 5.2 Comparison between capacity caused by GA optimization-based method and fixed-time

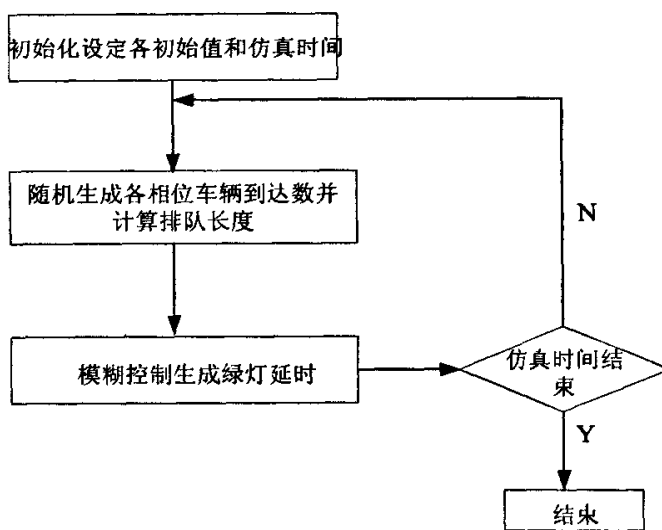


图 5.3 模糊控制仿真流程图

Fig. 5.3 The simulation flow diagram of Fuzzy control

(3) 可变相序模糊控制与定时控制比较

在各相位交通流量不相同的条件下,对可变相序模糊控制与传统模糊控制比较,如图 5.4 所示。

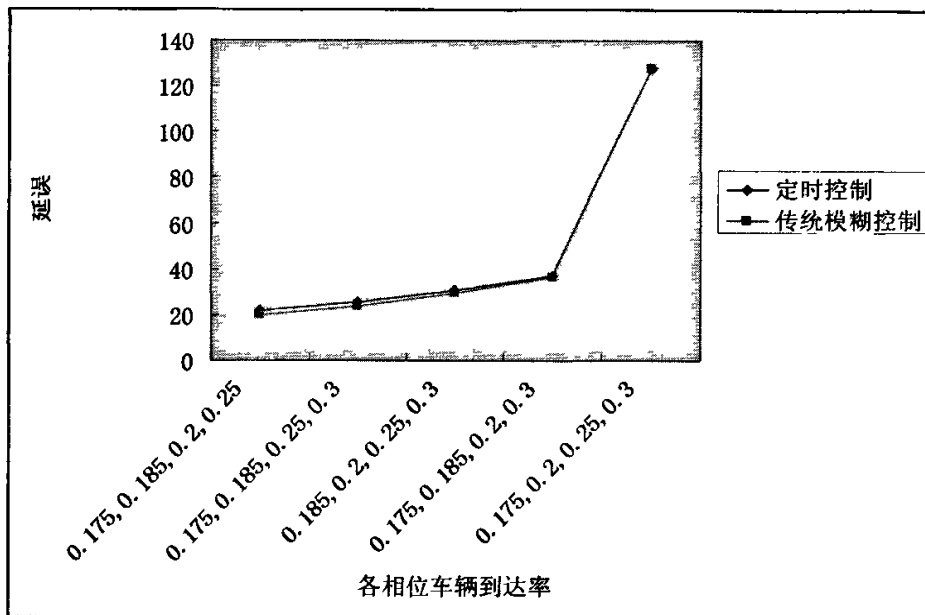


图 5.4 传统模糊控制与定时控制延误比较

Fig. 5.4 Comparison between delays caused by traditional fuzzy logic controller and fixed-time

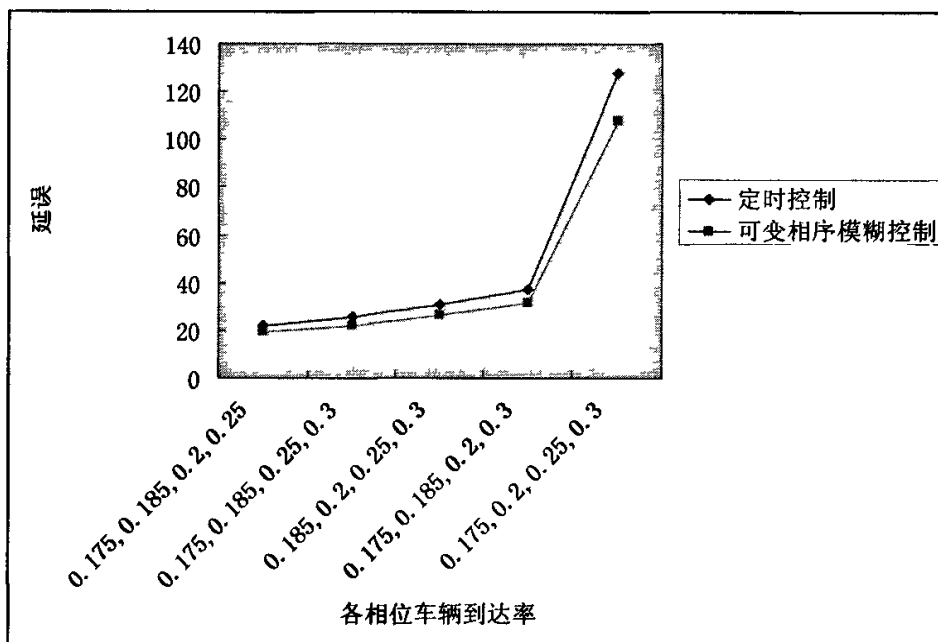


图 5.5 可变相序模糊控制与定时控制延误比较

Fig. 5.5 Comparison between delays caused by changeable phase fuzzy logic controller and fixed-time

仿真结果表明,在交叉口各相位交通流量不同的情况下,模糊控制与定时控制相比,效果并不明显。而可变相序模糊控制方法效果明显优于定时控制,平均延误降低了10%左右。交通流量变化越大,效果越明显。主要因为该方法不仅能根据实际交通环境确定相位切换时间,而且能综合各相位的优先权确定下一个放行相位。因此,我们可以将可变相序模糊控制方法应用到交通流量变化比较大的交叉口。

5.3 本章小结

在MATLAB环境下,对上述方法进行仿真。仿真实验表明,本文提出的基于遗传算法优化的多目标信号配时模型方法与定时控制相比,具有较好的性能,特别在高流量比条件下,能有效地提高交叉口的通行能力。可变相序模糊控制器在交通流变化比较大的交叉口,与传统模糊控制相比,更有效地降低交叉口的延误。

6 恶劣天气下的自适应控制方法的研究

6.1 恶劣天气对交通的影响

恶劣天气是影响道路交通环境的一个非常重要的、而且是无法避免的因素，其会严重降低道路的通行能力和安全性。特别是在高速公路、城市快速路、环路等车速快、流量大的道路上，雨、雪、雾、沙尘暴等恶劣天气往往是造成重大、特大交通事故的主要原因。

美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)对1995-2004年做了一个统计，平均每年有接近7400人死于与天气有关的事故，超过69万人受伤。每年有17%的重大事故，22%的轻微事故以及25%的财产损失事故会发生在恶劣天气下。大多数与天气有关的事故都发生在潮湿和雨天的入行道。76%的与天气有关的事故发生在潮湿的人行道，48%发生在雨天，14%发生在雪天，13%发生在有冰的人行道，10%发生在有雪的人行道上，不足3%的事故发生在雾天^[39]。

美国联邦公路局FHWA通过调查研究得出天气对道路的机动性产生的影响。由于道路被洪水淹没或积雪或大风形成道路的障碍而引起的通行能力的降低。道路关闭和通行受限也降低了道路的通行能力。在信号控制干线上，在雨天，速度能够降低10%-25%；在雪天，能够降低30%-40%。干线上的旅行时间延误能增加11%-50%，视天气的恶劣程度而定。

此外，恶劣的天气状况也能造成道路维护部门，交通管理部门，紧急事件管理等部门运行和维护成本的增加。冬季道路维护费用大约占整个州交通部门维护预算的四分之一。每年，各州和当地的有关部门都要花费23亿美元用于雪和冰的控制操作，50亿美元用于修理由雪，冰损坏的基础设施。

6.2 恶劣天气对道路的影响

道路管理者通常将天气对道路的影响分为四类：

- (1) 由于潮湿，表面有雪，或者有冰等情况造成道路摩擦力的降低
- (2) 由于雾，降雨，或车辆的喷溅造成能见度受限
- (3) 由于积水或积雪造成的通行障碍
- (4) 基础设施损坏

针对不同的类别，可以采用不同的控制方法。

摩擦力的降低，受限的能见度，以及通行障碍都会在许多方面影响交通流，引起车速降低，车速的频繁变化，以及道路通行能力的降低。而且，这些也影响了整个系统的

性能的其他方面。例如，车辆的性能影响驾驶员的能力和行为。交通需求的变化可能由于人们推迟旅行和改变旅行的时间。一方面，人们可能会选择开车以避免在去公交车站或火车站的途中弄湿；另一方面，雪天也可能引起一些驾驶员改乘汽车或火车以避免危险的行车条件。

由此可见，天气不仅妨碍了整个系统的运行性能，而且也降低了安全，增加了事故的风险。因此我们有理由采取行动来管理和降低这些因素的影响。

6.3 恶劣天气下信号配时的研究现状

因为正常条件下配时方案所使用的交通流参数发生了变化。理想情况下，交通信号协调控制系统能够适应变化的交通流量和交通状况。因此，恶劣天气信号协调控制方案必须使用与恶劣天气有关的交通流参数来产生。目前国外的研究状况^[40-46]如下：

6.3.1 盐湖城的研究

在1999-2000年，对犹他州盐湖城进行了一项确定在恶劣天气下改变配时方案可行性的研究。进行该研究的原因是，司机在恶劣天气下会表现的很小心，这影响了干线的运输能力。

此外，盐湖城区域交通信号系统不是一个能根据交通状况的变化而改变的自适应系统，但是信号机与控制中心有直接的通信链路相连，所以，如果需要的话，配时方案可以远程更新。因此，如果使用恶劣天气下的交通流参数产生配时方案，就可以很容易地进行手动实现该方案。

研究者对两个交叉口的的高峰期间的数据进行收集。收集的数据包括：饱和流率，自由流速，启动损失时间。总共收集了十四天的数据。此外，还收集了一些干燥天气下的数据以做比较。收集的数据总共包括六种不同的天气状况：潮湿，潮湿并且伴有雪，潮湿且泥泞，道路泥泞，有雪且粘，有积雪。

恶劣天气下，交叉口饱和流率降低主要有以下几个原因。首先，驾驶员会降低车速，由于可见度低且开车会很小心。而且，他们加速也会很慢，最后一辆车与前一辆车之间的间距就会增加。盐湖城的研究表明：饱和流率的降低与天气的恶劣程度成正比。在雨天，只降低6%。在恶劣天气下，自由流速也会降低。收集了18天的速度数据，发现速度的降低与天气的恶劣程度也成正比。在潮湿天气下，速度的降低只有10%。启动损失时间的降低是由于车辆与道路之间的摩擦力的减小。在盐湖城的研究中，启动损失时间的降低只在寒冷天气下会发生。潮湿天气的影响很小。

该研究只给出了黄灯和全红相位绿灯长的考虑。对于人行道，作者引用了早期的研究，人行速度在恶劣天气下会增加。因此，作者得出结论，在恶劣天气下，人行相位不

需要加长。由于摩擦力的变化，需要的停车距离可能增加。因为信号交叉口的困境区域依赖于车速和停车距离，黄灯的长度需要变化以消除该区域。此外，速度的降低和存在困境区域的可能性的增加都会引起全红时间不够。作者提出，黄灯时间要增加 10%-15%，全红时间增加 1s，但是没有给出为什么要这么做。

研究指出性能降低最大的情况是在天气从“潮湿有雪”变化到“潮湿泥泞”。并把它作为改变信号配时方案的临界点。用来描述性能降低的数字是在“潮湿有雪”之后三种情况下的平均值。作者还引用了最近的自动实现信号配时方案转换的例子，目的是帮助交通管理人员决定何时启动新的配时方案。建议实现方案时，应该考虑的参数包括：天气事件的严重性，天气事件的持续时间，影响区域，交通流。

作者建议改变相位差，绿信比和清空间隔时间，但是不改变周期长。最终的研究结果是，饱和流率，速度的降低，启动损失时间的增加，以及黄灯和全红时间的增加。作者计划通过运行模拟软件 Synchro 来验证他们研究的正确性，但是目前还没有进一步研究的结果。

6.3.2 安克雷奇市的研究

该研究主要分析阿拉斯加州的安克雷奇市，一个含有 24 个信号灯的交通网络，恶劣天气对该网络交通流的影响。交通流参数包括饱和和流量，通行能力，启动损失时间，车速。对这些数据的调查包括夏天，冬天及严寒天气下。研究发现，车速在冬天会降低，在严寒天气下，降低得更多。此外，冬季饱和流率会降低 12%。有了这些信息，就可以采用 Signal85 和 TRANSYT-7F 开发新的配时方案。前者用来产生相位序列和绿信比，后者用来决定相位差。采用新的配时方案之后，此干线网络延误降低了 23%，行程时间降低了 13%。

6.3.3 佛蒙特州的研究

该研究是由佛蒙特州大学得研究人员进行的。进行该研究的主要原因与其他的研究很类似，由于天气对信号交叉口的交通流影响很大，所以研究人员试图找出该问题的解决方案，然而，解决方法必须对原有的信号控制系统不会做太大的改变。因为以前没有人对新英格兰地区进行研究，所以有必要进行该项研究。

佛蒙特州大学附近的一个孤立交叉口用于收集数据。收集的数据包括六种不同的天气情况，这于盐湖城研究分类是一致的，除了积雪情况没有包括之外。收集的数据是在 2002-2003 年的冬天，从早上 7 点到晚上 7 点，采用视频摄像头花费了三个月的时间。

采用变化分析软件(ANOVA)对数据进行统计分析。分析表明，饱和流率有很大的变化，而启动损失时间只有很小的变化。通过多项比较测试，表明除了在“干燥和潮湿”，

“潮湿和潮湿有雪”，和“潮湿泥泞和潮湿且粘”的情况之外，饱和和流率的差异很明显。

为了分析基于天气的信号配时方案的效益，使用了两种软件包。第一个是微观模拟程序 CORSIM，它用于确定影响，另外一个 TRANSYT-7F，它用于开发配时方案。为了校准，CORSIM 的饱和车头距，自由车速，启动损失时间都进行了调整。

为了评估效益，作者比较了在干燥天气下采用优化的配时方案和恶劣天气下采用新的配时方案下，性能指标的差异。TRANSYT-7F 和 CORSIM 都能进行效益的评估。评估的性能指标是平均延误时间，整个延误时间和平均速度。在两个模拟程序中，恶劣天气下采用新的配时方案都能带来效益。然而，CORSIM 的结果表明，其延误时间降低的程度和速度增加的程度都不及 TRANSYT-7F 的效果。为了验证他们的研究，研究人员还将他们的结果与阿拉斯加州的安克雷奇市、明尼苏达州的研究进行比较。结果发现，TRANSYT-7F 的结果类似于明尼苏达州的结果，而 CORSIM 的研究结果表明采用新的配时方案只能获得较小的效益。而阿拉斯加州的研究结果表明获得的效益比佛蒙特州的任何模拟结果都大。

通过上面的各个研究，我们可以看出，恶劣天气下信号配时的研究必须经过三个方面的工作。分别为：确定恶劣天气对交通流参数的影响，(通过收集数据，分析数据得出一般性的规律)；对交通仿真模型进行修正，使他符合恶劣天气的状况；利用宏观仿真软件生成新的配时方案，并对新方案进行效益评估。

6.4 本章小结

本章首先分析了恶劣天气对道路、交通产生的影响，以及影响的主要方面。然后，对国外的研究现状进行研究，得出恶劣天气下信号配时研究，必须经过三个方面的研究。分别为：确定恶劣天气对交通流参数的影响；对交通仿真模型进行修正，使它符合恶劣天气的状况；利用宏观仿真软件生成新的配时方案，并对新方案进行效益评估。

结 论

单点控制在交通控制中是一种很重要的、常用的控制方式，本文针对单点控制中存在的问题，对单点自适应控制方法进行了研究。主要得出如下的结论：

(1) 本文通过对当前单点控制的研究现状进行分析，得出单点自适应控制方法是一种很有效的控制方法，也是未来信号控制研究的一个重要方向。

(2) 基于优化的控制方法是交通信号控制中最早采用的，也是应用最普遍的方法。目前很多商业系统仍然采用此方法进行信号控制，并且取得了很好的控制效果。因此，很有必要对此方法进行研究。通过对现有的各种数学模型的分析，提出了一种多目标的信号配时模型，该模型能够较好的反映交通需求。仿真实验表明，该方法在高流量比条件下，通行能力比定时控制方法提高8%左右；在低流量比条件下，延误比定时控制方法降低4%左右。

(3) 基于模糊逻辑的控制方法是目前研究最多的一种智能方法。理论上，模糊控制由于不需要建立精确的数学模型，具有能够模仿交警的控制经验的优点。本文通过对传统的模糊控制、可变相序的模糊控制与定时控制的仿真实验，结果表明，可变相序的模糊控制与定时控制相比，对交通流变化比较大的交叉口，有明显的改善。

(4) 恶劣天气下的信号配时研究具有重要的研究意义。目前国外的研究比较多，也已经有一些应用，但是目前国内研究的比较少。通过对国外研究的总结，我们可以得出对恶劣天气配时的研究要经过交通流参数的采集，分析，对模型的修正，以及评估等几个阶段研究。

本文对单点自适应控制方法进行了分析，总结，并对前人的方法进行了改进，通过实验证明了方法的有效性和合理性。然而，仍然存在一些不足。主要有：

(1) 在模糊控制算法中，隶属度函数是固定的。而有新的研究表明，可采用遗传算法、神经网络等智能方法自适应调整隶属度函数，可对模糊控制进行优化。

(2) 本文的可变相序模糊控制方法只与基于优化的方法进行了对比，以后的研究还要与感应控制等其他方法进行对比，以证明其效果的优劣。

(3) 本文只在MATLAB中进行了仿真。在以后的研究中，需要在Vissim等微观仿真软件下进行仿真和性能评估。

(4) 进一步研究恶劣天气下的信号配时方案。

参 考 文 献

- [1] 王飞跃, 截汝为, 张嗣滋等. 关于城市交通、物流、生态综合发展的复杂系统研究方法. 复杂系统与复杂科学. 2004, 1(2): 60-69.
- [2] 刘智勇. 智能交通控制理论及应用. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 杨佩昆, 吴兵. 交通管理与控制. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] Kemp S, Percival M, Silcock P. Dynamic strategy selection-implementation and results. The Tenth International Conference on Road Transport Information and Control, London, UK, 2000: 187-191.
- [5] Crabtree M R, Henderson I R. MOVA traffic control manual. TRRL Application Guide 44. 2005.
- [6] Darcy bullock, Tom Urbanik. Traffic signal systems addressing diverse technologies and complex user needs. Transportation in the New Millennium, Transportation Research Board. 2000.
- [7] Yu C, Lawrence W. Adaptive traffic signal control with iterative genetic fuzzy logic controller. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control, Taipei, Taiwan, 2004: 287-292.
- [8] Hong Li, Prevedouros P D. Traffic adaptive control for oversaturated isolated intersections: Model development and simulation testing. Journal of Transportation Engineering, 2004. 130(5): 594-601.
- [9] Vincent R A, Peirce J R. The MOVA signal control system. DfT Traffic Advisory Leaflet. 1997.
- [10] 徐勋情, 黄卫. 单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法. 控制理论与应用. 2005, 22(3): 413-422.
- [11] 杨锦冬, 杨东援. 城市信号控制交叉口信号周期时长优化模型. 同济大学学报. 2001, 29(7): 789-794.
- [12] 顾怀中, 王炜. 交叉口交通信号配时模拟退火全局优化算法. 东南大学学报. 1998, 28(3): 69-72.
- [13] 全永荣. 城市交通控制. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [14] 张国华. 平面交叉口信号相位设计专家系统理论框架研究. 交通运输系统工程与信息. 2001, 2(2): 170-175.
- [15] 马建明. 信号交叉口优化设计及其微观仿真研究: (博士学位论文). 北京: 北京工业大学, 2001.
- [16] 王殿海. 交通流理论. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [17] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究: (博士学位论文). 吉林: 吉林大学, 2004.
- [18] 陈宽民, 严宝洁. 道路通行能力分析. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [19] ALLOP R E. Delay at a fixed time traffic signal: theoretical analysis. Transportation Science. 1972, 6(3): 260-285.
- [20] Halim C, Michael G H. Traffic signal timing optimization based on genetic algorithm approach including drivers routing. Transportation Research Part B. 2004, 38(2): 329-342.
- [21] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [22] 诸静. 模糊控制原理与应用. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [23] Pappis C P, Mamdani E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 1997, 7(10): 707-717.

- [24] 徐冬玲, 方建安, 邵世煌. 交通系统的模糊控制及其神经网络实现. 信息与控制. 1992, 1(2): 74-78.
- [25] 陈洪, 陈森发. 单路口交通实时模糊控制的一种方法. 信息与控制. 1997, 26(3): 22-23.
- [26] 陈森发, 陈洪, 徐吉谦. 城市单路口交通的两级模糊控制及其仿真. 系统仿真学报. 1998, 10(2): 35-40.
- [27] 刘智勇, 朱劲, 李秀平等. 单交叉口的多相位模糊控制. 信息与控制. 1999, 28(6): 453-458.
- [28] Niittymaki J, Pursula M. Signal control using fuzzy logic. Fuzzy Sets and Systems. 2000, 116(1): 11-22.
- [29] Hoyer R, Jumar U. Fuzzy control of traffic lights. Proceedings of The Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Orlando, USA, 1994: 1526-1531.
- [30] 张国良, 曾静, 柯熙政等. 模糊控制及其Matlab应用. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [31] Murat Y S, Gedizlioglu E. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions. Transportation Research: Part C. 2005, 13(1): 19-36.
- [32] Trabia M B, Kaseko M S, Ande M. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals. Transportation Research: Part C. 1999, 7(6): 353-367.
- [32] Favilla J, Machion A, Gomide F. Fuzzy traffic control: adaptive strategies. Proceedings of the Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Francisco, USA, 1993: 506-511.
- [33] Gao Junxia, Li Jianguo, Zhao Xiaohua. Two-stage fuzzy control of urban isolated intersection signal for complex traffic conditions. Proceedings of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, China, 2004: 5287-5291.
- [35] 沈国江, 孙优贤. 基于相序优化的多相位模糊交通控制. 控制与决策. 2002, 11(1): 654-663.
- [36] 陈淑燕, 陈森发, 周延怀. 单路口交通多相位模糊控制器的设计与仿真. 电子技术应用. 2002, 28(2): 28-31.
- [37] 乔健, 宣慧玉, 姜锦虎. 兼顾效率与公平的模糊交通控制模型. 西安交通大学学报. 2006, 40(1): 120-124.
- [38] 胡国亮, 陈久康. 用MATLAB进行模糊控制器的设计和仿真. 基础自动化. 2000, 7(1): 15-20.
- [39] Paul P, Lynette G. How do weather events impact roads. URL: http://ops.fhwa.dot.gov/Weather/q1_roadimpact.htm.
- [40] Peter T. Utah R. Traveler information evaluation. URL: <http://www.Mountain-plains.org/pubs.html/mpc-01-120/html>.
- [41] Manish A, Thomas H, Reginald S. Impact of weather on urban freeway traffic flow characteristics and facility capacity. Technical Report. 2005.
- [42] James C S, Daniel C. Traffic responsive signal timing for system-wide traffic control. Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, NewMexico, 1997: 2462-2463.
- [43] Panos D P, Kerwin C. Potential effects of wet conditions on signalized intersection LOS. Journal of Transportation Engineering. 2005 2(6): 898-903.
- [44] Joseph P J, Peter T M, Blake G H. Modifying signal timing during inclement weather. Transportation Research Board. 2001, 1(1): 1-8.
- [45] Maki, Pamela J. Adverse weather traffic signal timing. 69th Annual Meeting of the ITE, Las Vegas,

1999: 203-208.

[46] James C, Daniel C. Wet weather signalization. URL: <http://www.gmupolicy.net/its/o-wetweather.htm>.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

[1] 李晓娜. 基于遗传算法的单点多目标信号配时优化. 大连理工大学研究生网络学刊. 属于学位论文第3章。

致 谢

感谢恩师谭国真教授对我两年来的培养教育，他的言传身教指引了我成长的道路。两年中跟随谭老师工作学习，从他身上学到了很多作为科研工作者要取得成功所必须的素质，包括：严谨的逻辑、宏观的思考、敏锐的方向感、超前的研究意识等等；也从他身上学到了很多为人的道理，以及勇于责任、勤勉、不倦的追求。这里我要衷心的感谢恩师对我的批评指正，对于他的批评我经过了一个从难以理解到恳切自醒的过程，当我即将结束硕士学业的时候，回望走过的路，感受到的是谭老师在当时当刻迫切希望塑造学生成材的心情和为了让学生今后少走弯路所煞费的苦心。我将铭记他的话语，戒骄戒躁，再创佳绩。

对本文研究工作做出贡献的人还包括：李晓红、陈超、丁蕾、孙永杰、徐玉霞。这里，对他们给我的帮助一并表示感谢。感谢实验室的李大奎老师、姚卫红老师、王凡老师，师兄伍建琨、李新鹏，同届的其他兄弟姐妹对我的帮助和关怀，祝他们工作顺利，身体健康。

最后，感谢我的父母对我的养育之恩，24年如一日的辛勤抚育和悉心培养。感谢我的男朋友赵殿奎对我生活和学习上的帮助。