

# 基于宏观基本图的城市道路交通信号迭代学习控制

闫 飞/著

Iterative Learning Control for Traffic Signals of  
Urban Road Based on Macroscopic Fundamental Diagram



科学出版社

# 基于宏观基本图的城市道路 交通信号迭代学习控制

闫 飞 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

城市道路交通信号控制是城市交通管理的重要手段,合理的信号配时对改善交通流在路网中的运行效率、提高路网的通行能力、缓解城市交通拥堵具有重要意义。本书系统地阐述了宏观基本图框架下迭代学习控制理论在城市交通信号控制中应用的最新研究成果,主要内容包括宏观基本图的介绍以及输入受限及输入和状态同时受限、系统带有初态误差和随机外部扰动等情形下迭代学习控制理论在城市交通信号控制中的应用等。

本书可供在研究机构从事迭代学习控制理论、城市交通控制等研究工作的科技工作者,以及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于宏观基本图的城市道路交通信号迭代学习控制/闫飞著. —北京:科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-058909-5

I. ①基… II. ①闫… III. ①城市道路-交通信号-自动控制  
IV. ①U412.37②U491.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 218584 号

责任编辑:姜红 张培静 / 责任校对:蒋萍

责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张:10

字数:202 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

中国经济社会的快速发展和城市化水平的不断提高，使得城市交通供需关系之间的矛盾日益加剧，由此带来的交通拥堵日渐频繁，继而引发了环境污染、能源浪费、交通安全等一系列社会问题。在复杂的城市路网中，各交叉口之间是相互牵连、相互影响的，随着交通流量的不断增大，路网中单个交叉口的拥堵很可能会扩散到其邻近的区域甚至蔓延到整个路网，这显然已经无法通过扩充或新建道路等基础设施加以解决，因此采用科学有效的交通信号控制策略成为解决城市交通问题的重要手段。

由于城市路网中各交叉口具有高度的关联性，因此路网的整体协同控制不能局限于局部路网的优化控制，而是需要从路网的全局考虑，通过对交通需求的管理和各交叉口的联动控制来提高路网的通达性，最大限度地发挥路网的通行效率。宏观基本图（macroscopic fundamental diagram, MFD）是研究路网通达性和运行效率的重要工具，其从宏观层面对路网进行集计分析，描述了路网的平均流量、平均密度和平均速度三个变量间特定的函数关系，反映了整个路网的交通量与路网运行水平的关系。研究表明，路网中车辆的密度分布是影响路网 MFD 的关键因素，均匀的车辆密度分布能够使路网具有更高的通行效率，即路网具有更理想的 MFD。影响路网中车辆密度分布的因素有很多，但交通信号控制作为城市交通流管理的主要手段，对路网中的车辆密度分布具有直接影响，因此可以采取更有效的信号控制策略调控车辆的密度分布，使路网内的交通流具有更好的同质性，进而使路网获得更理想的 MFD。此外，从宏观角度看，每天的交通流都具有相似的时空分布，而迭代学习控制（iterative learning control, ILC）方法是解决具有重复特性被控系统控制问题的有效方法，其能够利用系统先前试验得到的信息不断修正控制输入来改善系统的控制性能。因此，可以探索利用交通流相似性的时空分布规律对城市路网的交通信号实施迭代学习控制，通过对交通信号的迭代控制使路网内的交通流密度分布更加均衡，从而使路网获得更理想的 MFD。

近年来,作者在宏观基本图框架下对迭代学习控制理论在城市交通信号控制中的应用做了大量的研究工作,并在国际、国内期刊上发表了多篇相关论文。事实上,基于MFD的城市交通信号控制已经形成了系统的研究框架。研究内容主要集中在以下几个方面:①MFD特性及影响因素研究;②基于MFD的城市路网控制子区的划分;③基于MFD的控制子区边界控制策略;④基于MFD的控制子区内部均衡控制策略。作者主要在宏观基本图框架下对基于迭代学习的城市局域路网内部均衡控制进行了深入的研究。因此,有必要将现有的研究成果进行总结,整理成专著,方便相关领域研究人员参考和借鉴,进一步完善城市交通信号控制理论。

本书系统地阐述了宏观基本图框架下迭代学习控制理论在城市交通信号控制中应用。控制对象从单点交叉口信号控制、干线信号协调控制到局域路网及区域路网的信号协调控制,研究内容包括宏观基本图特性以及宏观基本图框架下输入受限及输入和状态同时受限、系统带有初态误差和随机外部扰动等情形下迭代学习控制理论在城市交通信号控制中的应用等。

作者一直从事迭代学习控制理论及其在城市交通信号控制中的应用研究,本书反映了作者近年来在该领域的最新研究成果。在撰写过程中,作者得到了家人、朋友和学生的大力支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。作者在书中引用了一些学者的论著,在此向他们表示深深的谢意。本书的有关科研工作得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(项目编号:61703300)的资助,以及太原理工大学电气与动力工程学院领导和同仁的大力支持,在此表示诚挚的感谢!

由于作者能力有限,错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

闫 飞

2018年3月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 交通信号控制概述	3
1.1.1 交通信号控制的基本概念	3
1.1.2 交通信号控制参数	5
1.1.3 交通信号控制分类	6
1.2 城市交通信号控制发展概况	8
1.2.1 城市交通信号控制系统发展史	8
1.2.2 典型的城市交通信号控制系统	10
1.2.3 城市交通信号控制研究的最新进展	14
1.2.4 基于迭代学习的城市交通信号控制方法研究现状	17
1.3 本书的研究内容	19
第 2 章 路网宏观基本图	21
2.1 宏观基本图简介	21
2.2 宏观基本图的基本特性	21
2.2.1 宏观基本图的存在性	22
2.2.2 宏观基本图的理论模型	24
2.2.3 宏观基本图的形状	25
2.2.4 宏观基本图的适用条件	26
2.3 宏观基本图的影响因素	27
2.3.1 路径选择行为的影响	27
2.3.2 道路属性的影响	28
2.3.3 道路条件的影响	30

2.3.4	管理策略的影响	33
2.4	宏观基本图在路网分析和控制中的应用	34
2.4.1	交通子区划分中的应用	34
2.4.2	路网控制中的应用	35
2.4.3	路网模型构建中的应用	36
2.4.4	交通评价中的应用	36
2.5	本章小结	36
<b>第 3 章</b>	<b>城市单点交叉口信号的约束迭代学习控制</b>	<b>37</b>
3.1	数据来源	37
3.1.1	调查方法	37
3.1.2	调查区域	38
3.1.3	数据调查	39
3.2	交通流模型	40
3.2.1	存储转发模型	40
3.2.2	路网状态空间方程	42
3.3	绿冲突分析	44
3.3.1	信号相位	44
3.3.2	间隔矩阵	45
3.3.3	绿冲突检测	46
3.4	带有约束的城市单点交叉口信号迭代学习控制	48
3.4.1	问题描述与基本假设	48
3.4.2	迭代学习控制律设计	48
3.4.3	输入受限时迭代控制律的收敛性分析	49
3.4.4	输入和状态同时受限时迭代控制律的收敛性分析	52
3.5	案例仿真	56
3.5.1	仿真平台	57
3.5.2	仿真分析	57
3.6	本章小结	68

第 4 章 城市干线交通信号的鲁棒迭代学习控制	69
4.1 带有初态误差的城市干线交通信号迭代学习控制	69
4.1.1 问题描述与基本假设	69
4.1.2 迭代学习控制律设计	70
4.1.3 带有初态误差时迭代控制律的收敛性分析	70
4.2 含随机扰动的城市干线交通信号迭代学习控制	74
4.2.1 问题描述与基本假设	74
4.2.2 迭代学习控制律设计	75
4.2.3 含随机扰动时迭代控制律的收敛性分析	75
4.3 案例仿真	78
4.3.1 系统带有初态误差的情况	80
4.3.2 系统含随机扰动的情况	85
4.4 本章小结	90
第 5 章 城市局域路网交通信号的开闭环 PD 型迭代学习控制	91
5.1 问题描述及基本假设	91
5.2 城市局域路网交通信号的开闭环 PD 型迭代学习控制策略	92
5.2.1 开闭环 PD 型迭代学习控制律设计	92
5.2.2 开闭环 PD 型迭代学习控制律的收敛性分析	92
5.3 案例仿真	97
5.4 本章小结	104
第 6 章 基于迭代学习控制和 TUC 的城市区域交通信号混合控制	105
6.1 TUC 策略	105
6.2 基于迭代学习控制和 TUC 的交通信号混合控制策略	106
6.2.1 问题描述与基本假设	106
6.2.2 控制律的设计思想	107
6.2.3 基于迭代学习控制和 TUC 的混合控制律设计	108
6.2.4 基于迭代学习控制和 TUC 的混合控制律的收敛性分析	109

---

6.3	案例仿真 .....	117
6.4	本章小结 .....	123
<b>第 7 章</b>	<b>城市交通信号的迭代学习控制对路网宏观交通状态的影响</b> .....	<b>124</b>
7.1	路网的宏观交通流参数与基本图 .....	124
7.1.1	宏观交通流参数 .....	124
7.1.2	宏观基本图的演化规律 .....	125
7.2	基于宏观基本图的路网交通状态划分 .....	126
7.3	迭代学习控制对路网宏观交通状态的影响 .....	127
7.4	案例仿真 .....	128
7.5	本章小结 .....	134
<b>第 8 章</b>	<b>结论</b> .....	<b>135</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>138</b>
	<b>附录 A <math>\lambda</math>-范数</b> .....	<b>146</b>
	<b>附录 B 实测交叉口信号配时方案</b> .....	<b>147</b>

# 第 1 章 绪 论

社会经济的快速发展给人们的生产生活方式带来了深刻变化，其中最直接的体现就是机动车保有量的急剧增长。根据中华人民共和国国家统计局的统计数据，截至 2014 年年底，中国民用汽车的数量达到 15447 万辆，比 2013 年末增长 12.4%，其中私家车数量为 12584 万辆，增长了 15.5%<sup>[1]</sup>。然而，人们在享受汽车给出行带来便利的同时也面临着越来越多的交通问题带来的困扰，这些交通问题已经给人们的出行效率和生活质量造成了严重的影响。产生诸多城市问题的根源主要是交通供求关系的不平衡引发的交通拥堵。目前，交通拥堵问题已成为世界各国普遍面临的难题。根据数据显示，美国每年因交通拥堵造成的经济损失达 1210 亿美元；英国每年因交通拥堵造成的经济损失为 43 亿英镑；而在中国，交通拥堵带来的经济损失占城市人口可支配收入的 20%，相当于每年国内生产总值损失 5%~8%，每年达 2500 亿元人民币<sup>[2]</sup>。此外，交通拥堵加大了机动车的燃油消耗和有害气体的排放，从而使能源消耗不断上升，环境污染进一步加剧。在交通拥堵情况下，车辆的频繁启动和加减速过程会额外消耗大量的燃料并对大气造成严重的污染。据统计，2011 年美国因交通拥堵额外消耗的燃油量达 109.8 亿升；英国每年因交通拥堵浪费的燃油价值达 4.26 亿英镑；在中国，机动车的交通污染已占到了整个城市大气污染的 50% 以上，机动车有害气体的排放成为城市大气污染的主要来源之一。日益加剧的城市大气污染会给人们的日常生活和身体健康造成严重的影响<sup>[3]</sup>。

由上述内容可以看出，随着中国经济的发展和城市化水平的提高，城市交通状况日益严峻，如何解决交通拥堵及其产生的一系列交通问题已经引起交通管理部门和学者的广泛关注。传统的方法是通过拓宽路面、增加车道、改进道路交叉口容量或修建更多的道路和高架桥等措施来提高路网的通行能力，但这些方法因成本高、实施难度大、周期长且容易破坏城市环境而无法被长时间采用。实践证明，通过物理扩张的传统手段并不能无限制地满足交通需求，也不能从根本上解

决城市交通问题。因此，只有在拓展城市道路基础设施的基础上，加强对交通需求的管理，同时采用更科学高效的交通控制方法对城市路网进行优化控制，提高现有道路系统的使用效率，才能有效缓解交通拥堵。

城市道路交叉口是交通流在路网中的集散地，同时也是产生车辆延误、额外燃油消耗和尾气排放的主要场所，而交叉口信号控制是调节和管理城市交通流的直接手段和主要措施。不合理的信号配时很容易导致车辆在交叉口处产生拥堵，而且一个交叉口的堵塞会波及与其邻近的其他交叉口和相关区域，甚至造成整个路网的交通瘫痪。可以说城市道路交叉口的交通运行状况与城市整个路网的交通运行状况密切相关，因此研究采用科学高效的交叉口信号控制策略对促进交通流在路网中的合理分配，减少车辆的燃油消耗和尾气排放，缓解交通拥堵以及提高路网的通行能力具有重要意义。

通过交通信号控制策略对交通流实施控制，就需要了解城市交通流的特性。从不同的角度看交通流会呈现出不同的特点：一是从微观角度看，实际的交通流由于受驾驶员驾驶习惯、出行时间及突发事件等多种因素的影响，交通流呈现出很强的不确定性和随机性。因此，对复杂的交通流动力学特性进行精确的数学建模和辨识是极其困难的。此外，在交通流运行过程中，还存在着各种外部随机扰动。这些未知的随机扰动会导致交通流的动力学模型难以获得，甚至无法获得。因此，传统基于交通流模型的控制方法由于受交通流模型的不精确性影响而难以达到满意的控制效果。二是从宏观角度看，交通流具有相似的时空分布规律。如每一天的交通流都可以认为是从凌晨一个很小的值开始逐渐增大，在 7:00~9:00 达到早高峰，然后逐渐趋于平缓，直至 17:00~19:00 出现晚高峰，而交通拥堵通常也发生在相同的时间和相同的地点。如何利用交通流周期性的时空分布规律对交通信号实施控制，且能够避开对复杂的交通流动态特性进行建模的难题是非常值得研究的问题。

迭代学习控制是专门针对运行过程具有重复性的受控对象提出的一种新的控制算法<sup>[4]</sup>。其具有如下特点：一方面，对于可重复的控制任务，迭代学习控制在每次施加控制时，充分利用了系统运行的重复性，根据系统前次运行过程中的控制量和跟踪误差不断修正当前输入，从而使系统的跟踪性能在迭代过程中不断提高。而使用传统的控制方法，无论系统重复运行多少次，系统的跟踪性能也不可能提高。另一方面，迭代学习控制对系统模型的依赖性不强，只需要知道输入

输出信息和少量系统知识就可以设计控制算法,是一种近乎无模型的方法。因此,迭代学习控制非常适用于那些非线性强、结构复杂的系统,解决了基于模型的控制方法因建模困难而无法施加有效控制的问题。

根据以上分析可以看出,迭代学习控制作为解决可重复运行系统控制问题的最有效方法之一,可以避开对复杂交通流动态特性进行精确建模和辨识的难题,直接利用系统的输入输出数据设计控制器,并使控制器在交通流的迭代运行过程中不断“学习”以往的控制经验来改善系统的控制性能。因此,研究基于迭代学习的城市交通信号控制方法在理论研究和实际应用方面均具有重要意义。将迭代学习控制方法应用于城市交通信号控制,有许多问题需要进一步的深入研究。目前关于这方面的研究文献并不多见,本书试图在宏观基本图框架下,围绕“城市交通信号的迭代学习控制”这一主题,对输入量受限、输入量和状态量同时受限、系统带有初态误差和随机外部扰动等情形下迭代学习控制理论在城市交通信号控制中的应用问题进行系统地阐述,以期为缓解城市交通拥堵和解决现有的城市交通问题提供新的思路和方法。

## 1.1 交通信号控制概述

交通信号控制是通过对道路交叉口信号灯灯色顺序及显示时间的控制,在时间上给交通流分配通行权的一种交通管理措施。信号配时方案的设置对交通流有序高效地通过交叉口,提高路网的通行能力及改善交通安全有着重要作用。交通信号控制虽然有理论分析的依据,但尚未形成完整的体系,有关的交通信号控制的很多理论仍然在研究之中。

下面仅对交通控制中的基本概念及交通信号的控制参数和控制方式作一简单介绍。

### 1.1.1 交通信号控制的基本概念

#### 1. 信号相位

信号相位是指在一个信号周期内,某个方向(或几个方向)上的车流能够同时得到通行权相对应灯色的连续时序。信号相位是按车流获得的灯色显示时

序进行划分的，有多少种显示时序就有多少个信号相位。根据交叉口的实际情况不同通常有两相、三相、四相等不同的信号相位。图 1-1 为四相位信号交叉口示意图。

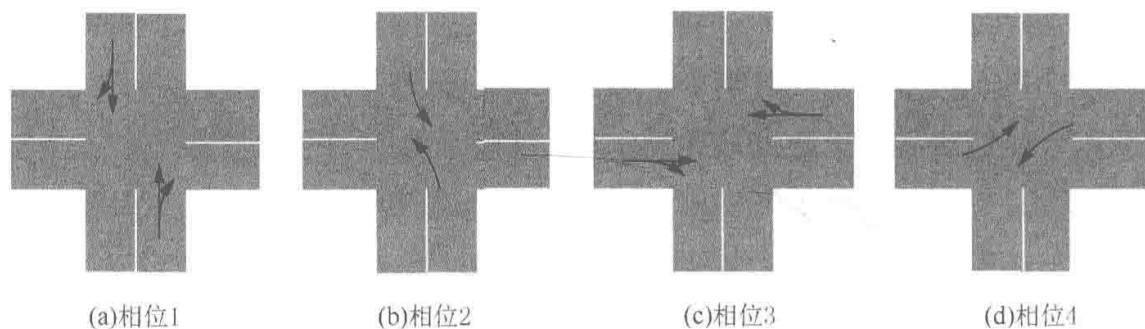


图 1-1 四相位信号交叉口示意图

## 2. 交通流量

交通流量指在单位时间内，通过道路上某一指定的地点或断面的实际交通参与者的数量，用  $q$  表示。其中参与者通常包括机动车、非机动车和行人。

## 3. 饱和流量

饱和流量是指在单位有效绿灯时间内能够连续通过停车线折算成标准车的最大车辆数，用  $S$  表示。基于饱和流量，根据信号周期长度及每个信号相位所占时间的长短，可以计算出信号控制交叉口各进口道各流向的通行能力。

## 4. 占有率

占有率可分为空间占有率和时间占有率。

(1) 空间占有率是指在道路的长度方向，车辆占有空间的比例，即

$$O_{cs} = \frac{\sum l_i}{L} \quad (1-1)$$

式中， $O_{cs}$ ——空间占有率；

$l_i$ ——第  $i$  辆车的长度；

$L$ ——观测区间长度。

(2) 时间占有率是指在一定的观测时间  $T$  内，车辆通过检测器时所占用的时间与总观测时间的比值，即

$$O_{ct} = \frac{\sum_i ((l_i + d) / v_i)}{T} \quad (1-2)$$

式中,  $O_{ct}$ ——时间占有率;

$l_i$ ——第  $i$  辆车的长度;

$v_i$ ——第  $i$  辆车的速度;

$d$ ——检测器自身的长度;

$T$ ——总观测时间。

### 1.1.2 交通信号控制参数

在交通信号控制中,基本的控制参数包括周期、绿信比和相位差。

#### 1. 周期

信号灯各种灯色依次显示一个循环所需的时间称为信号周期,用  $C$  表示,单位为  $s$ 。信号周期的长度对车辆通过交叉口有着重要的影响,若周期太短,容易导致拥堵,降低交叉口的通行能力;若周期太长,可能会使得某一方向分配的绿灯时间较长,而其余方向需要等待较长的红灯时间,增加车辆在交叉口的停车延误时间。

#### 2. 绿信比

绿信比指一个信号周期内某一相位的有效绿灯时长与信号周期长度的比值,用  $\lambda$  表示,即

$$\lambda = \frac{g}{C} \quad (1-3)$$

式中,  $\lambda$ ——相位的绿信比;

$g$ ——相位的有效绿灯时长;

$C$ ——信号周期长度。

#### 3. 相位差

相位差是交通信号协调控制中的一个重要的控制参数,有绝对相位差和相对相位差之分。绝对相位差是指信号的绿灯(红灯)的起点或终点相对于某一标准信号绿灯(红灯)的起点或终点的时间之差。相对相位差是指相邻交叉口同一相

位的绿灯（红灯）的起点或终点的时间之差，等于两个信号的绝对相位差之差。

### 1.1.3 交通信号控制分类

交通信号控制的分类主要有两种方式。一是按信号控制器的控制范围进行分类，主要包括单点交叉口控制，干线交叉口协调控制以及区域协调控制。二是根据信号控制器的控制方式进行分类，主要有定时控制、感应控制和自适应控制。

#### 1. 按控制范围划分

##### 1) 单点交叉口控制

单点交叉口控制，是以单个交叉口作为控制对象进行单独控制，不考虑其与相邻交叉口之间的相互关系，是交通信号控制的最基本形式。单点交叉口控制的主要目的是使车辆通过该交叉口时的延误时间和停车次数等指标达到最优，使交叉口的通行能力最大化，其主要的控制参数是绿信比和周期长度。

单点交叉口控制适用于相邻交叉口的距离比较远，干线协调控制效果不明显，或交叉口自身的交通需求变化比较显著，采用独立控制比干线协调控制更有效的情况。

##### 2) 干线交叉口协调控制

干线交叉口协调控制，是以干线上若干个相邻近交叉口的整体作为控制对象进行协调控制，通过各组信号间的协调控制使得干线上的车辆行驶具有连续性，以减少车辆延误和停车次数。干线交叉口协调控制的主要目的是通过信号的协调控制减少车辆不必要的排队延误和停车，使干线上的交通流能够连续通行，其主要的控制参数包括绿信比、周期和相位差。

干线交叉口协调控制的适用条件如下：①车辆到达性的要求。若交通流以脉冲方式到达各个信号交叉口，采用干线协调控制可得到较好的控制效果。②相邻交叉口之间的距离要求。在干线上相邻交叉口之间的距离较小，一般不宜超过 600m。③信号的周期时长要求。由单点配时确定的信号周期长度相差不大或近似成整数比例关系。④交通流的要求。干线协调控制适用于交通流饱和度较低的情况，且从两交叉口中间驶入路段的交通流量比例较小，否则容易使得干线上的车队变得离散。此外，与干线相交的支路上的交通流量也不宜太大。

### 3) 区域协调控制

区域协调控制,是将区域内所有交叉口视为一个整体进行信号的协调控制,这种控制方式是把区域内所有交叉口的信号联起来进行综合协调控制,使得区域内的车辆在运行过程中产生的总损失(如延误时间、停车次数、燃油消耗等)最小或使区域内路网的通行能力最大。

由以上分析可以看出,尽管各种控制方式均具有不同的适用范围,但由于城市交通问题不是某一个交叉口或某一条道路的个别现象,交通拥堵是整个城市范围内普遍存在的问题,随着城市道路交通量的增长,道路密度的增强,各个交叉口之间的关联性日益明显,一个交叉口处的车辆拥堵可能会影响到其周边的多个交叉口,甚至拥堵会逐步蔓延至整个路网。因此,研究如何从一个路网的整体出发,将路网内的所有交叉口进行有效的协调控制,以提高整个路网的运行效率,防止交通拥堵的发生成为目前主要的研究方向。

## 2. 按控制方式划分

### 1) 定时控制

定时控制是指信号控制机根据预先设定的配时方案进行信号控制。在定时控制中,所有的控制参数均是根据交叉口的历史交通流量数据预先计算得到的。在实际使用中,如果一天只执行一种配时方案的称为单时段定时控制;如果一天中按不同时段交通流量执行不同的配时方案称为多时段定时控制。定时控制是一种最基本的控制方式,其特点是不能实时地响应随机变化的交通需求,价格低廉,使用时安装维护比较方便。

### 2) 感应控制

感应控制是指信号控制机根据车辆检测器测得的短时交通需求,改变绿灯时间和周期时长的控制方式。在实际使用中可以分为两种:一种是半感应控制,即在交叉口部分进口道上安装车辆检测器,根据安装检测器路段的交通需求进行信号控制;另一种是全感应控制,即在交叉口的全部进口道上均安装车辆检测器,根据所有进口道的交通需求进行信号控制。

### 3) 自适应控制

自适应控制是指根据车辆检测器采集到的交通数据,按照某种评价指标并通过先进的优化控制算法进行优化控制以期达到最优控制的控制方式。自适应控制

的目的是不管交通流状况发生任何变化时,都能够使系统的控制性能达到最优或者次最优。这种控制方式是当前研究的重点。

## 1.2 城市交通信号控制发展概况

### 1.2.1 城市交通信号控制系统发展史

早在 100 多年前,人们为了保证各向冲突车辆安全有序地通过道路交叉口,就开始使用信号对车辆进行指挥控制。1868 年,英国伦敦的威斯敏斯特街口首次出现的红绿两色臂板式的燃气信号灯,标志着城市交通信号控制的开始。1914 年,美国的纽约和芝加哥等城市开始使用具有现代意义的手动操作的三色信号灯。1926 年,英国的伍尔弗汉普顿安装的机械式交通信号机,首次实现了单时段定周期红绿灯自动切换,开启了城市交通信号自动控制的新时代。1963 年,加拿大的多伦多建成了世界上第一个由 IBM650 型计算机控制的区域交通信号控制系统,该系统首次应用了计算机控制技术,极大地提高了系统的控制性能。此后,世界各国相继开始研究利用计算机技术控制较大区域的交通信号协调控制系统,以解决区域交通信号配时的优化问题。近半个世纪以来,多种交通信号控制系统相继问世,典型的有英国的交通网络研究工具(traffic network study tools, TRANSYT)<sup>[5]</sup>和绿信比-周期长-相位差优化技术(split-cycle-offset optimization technique, SCOOT)系统<sup>[6]</sup>,澳大利亚的悉尼协调自适应交通系统(Sydney coordinated adaptive traffic system, SCATS)<sup>[7]</sup>,意大利的信号连续优化技术(signal progression optimization technology, SPOT)/城市交通集成自动优化技术(urban traffic optimization by integrated automation, UTOPIA)系统<sup>[8]</sup>,法国的动态规划(dynamic programming, PROLYN)系统<sup>[9]</sup>,德国的在线控制网络的交通信号优化方法(method for the optimization of traffic signals in on-line controlled network, MOTION)<sup>[10]</sup>,美国的自适应控制的最优策略(optimization policies for adaptive control, OPAC)系统<sup>[11]</sup>,网络优化的无周期响应算法(cycle free responsive algorithm for network optimization, CYRANO)和实时、递阶、最优化、分布式可实施系统(real-time, hierarchical, optimized, distributed and effective system, RHODES)<sup>[12]</sup>,希腊的城市交通感应控制(traffic-responsive urban control, TUC)<sup>[13]</sup>等。其中,TRANSYT、