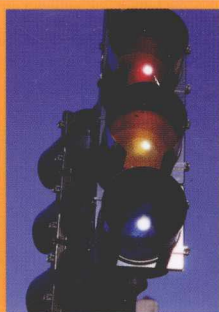
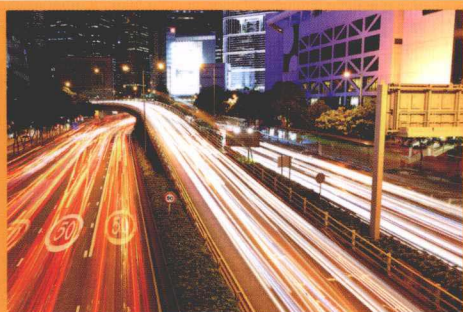


OPTIMAL TRAFFIC CONTROL

URBAN INTERSECTIONS



城市交通信号优化控制

原著者：[塞] Slobodan Guberinic (斯洛博丹·古柏利尼奇)

[塞] Gordana Senborn (格尔达娜·森伯恩)

[塞] Bratislav Lazic (布拉提斯拉夫·拉基奇)

张永忠 张福生 刘小明 王力 熊昌镇 译/李刚 校



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



OPTIMAL TRAFFIC CONTROL

URBAN INTERSECTIONS

城市交通信号优化控制

原著者：[塞] Slobodan Guberinic (斯洛博丹·古柏利尼奇)
[塞] Gordana Senborn (格尔达娜·森伯恩)
[塞] Bratislav Lazic (布拉提斯拉夫·拉基奇)

张永忠 张福生 刘小明 王力 熊昌镇 译/李刚 校



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍城市道路交通控制优化方法,包括其基本原理和相关的综合治理措施,是作者多年来在交通控制领域研究工作的成果。全书共分5部分:第1部分为信号控制路口交通过程数学模型;第2部分为交通控制问题阐述;第3部分为交通控制优化决策方法;第4部分为交通优化控制决策(信号方案);第5部分为选择完整信号组系列对路口运行的影响。

本书可作为高等院校交通控制领域高年级本科生、研究生的教材和参考书,也可作为从事交通控制领域的科研人员参考用书。

版权登记号 01-20115326

图书在版编目(CIP)数据

城市交通信号优化控制 / (塞)古柏利尼奇, (塞)森伯恩, (塞)拉基奇著; 张永忠等译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012.5

书名原文: Optimal Traffic Control: Urban Intersections

ISBN 978-7-5084-8972-8

I. ①城… II. ①古… ②森… ③拉… ④张… III. ①市区交通—交通信号—信号系统—自动控制 IV. ①U491.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第115388号

书 名	城市交通信号优化控制
原 著 者	[塞] Slobodan Guberinic (斯洛博丹·古柏利尼奇)
作 译 者	[塞] Gordana Senborn (格尔达娜·森伯恩) [塞] Bratislav Lazic (布拉提斯拉夫·拉基奇)
出版发行	张永忠 张福生 刘小明 王力 熊昌镇 译 李刚 校 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

当今城市的一个重要特点就是在一个相对狭小的区域内人口持续增长，随之而来的是城市道路网中车辆数量及人的出行需求和货物运输量的增长。

通常，道路网容量的增长总是落后于交通需求的增长。人们肯定不情愿面对这样的交通状况，即：交通出行所花的时间越来越长，环境及噪声污染越来越严重，交通事故率越来越高等。

为了减轻由于现代城市快速发展带来的消极影响，人们采取了各种各样的措施，例如：规划土地使用和改进交通控制等。其中最值得重视的是如何改进交通控制系统，因为这项措施无需在城市基础设施方面大动干戈。

然而，现代城市的交通控制无论是在理论上还是在实践上都是一个非常复杂的问题。其实，在这些城市中，交通运输体系本身被称之为包罗万象的复杂系统，其中包括海量的控制与状态变量、诸多不可预测和不可确定因素、交错关联的子系统、必要的优化目标以及受控过程对交通行为的影响等。

若不是近年来信息技术尤其是计算机与通信技术的飞速发展，人们依然难以想象交通控制系统有多么复杂。

当然，要实现对如此复杂系统控制的重要条件之一，就是解决控制问题的方法，特别是最优化方法。

一个信号控制路口可以通过忽略其他路口对其运行状态的影响单独考虑；另一方面，一个信号路口可能与其他信号控制路口距离非常近，需要考虑路口之间的协调。正因如此，优化控制问题必须分而治之，即：针对单点路口的控制，针对沿主干线一系列路口的干线协调控制（绿波），以及针对路网内大批路口包括一些临界路口的区域控制。

本书将重点关注单点路口本地控制的有关问题。这些问题之所以依然令人关注，是因为许多现有的本地算法依然没有充分发挥基于微处理器的交通信号控制器完整功效。事实上，相当多的单点路口（很多国家这类路口占有信号控制路口50%以上）被视为存在交通问题的重要路口。

本书所介绍的交通控制优化方法，包括其基本原理和相关的综合治理措

施是作者多年来在贝尔格莱德米哈罗·布平研究所自控系统部从事交通控制领域研究工作的成果。

在此，作者衷心感谢为完成本书所作出贡献的同事们，尤其感谢 Mgr. Miomir Šegović 参与选择完整信号组系列改善路口性能以及以非线性规划解决优化问题的课题。

同时也衷心感谢 Snežana Mitrović-Minić 博士参与选择完整信号组系列优化问题的阐述和解决方案的研究。

作者在此还特别感谢 Radivoj Petrović 教授在本书问世过程中坚持不懈的支持与鼓励。

原著者

2008 年于贝尔格莱德

前言

原著

现代城市交通控制最普遍的手段为通过交通信号进行交通控制，交通信号可以“解决”路口内不同交通流的冲突。虽然从这一点来看目标一致，但是针对不同的关注要点，如路口通行能力、延误或环境污染等所采用的特定方法会导致不同的结果，交通工程师的主要课题在于选出能够避免彼此矛盾，并获得如最小延误或最小污染等方面效果的理想方法。

自从1868年伦敦安装了世界上第一台交通信号控制器以来，从单个路口本地控制，到一系列路口的干线协调（“绿波”），乃至覆盖涉及成百上千路口的系统控制（“区域交通信号控制系统”），利用信号灯进行交通控制的交通信号控制系统已经取得了重大发展。第一条绿波带控制1918年实现于美国盐湖城，而第一套区域控制系统于1969年在加拿大多伦多投入使用。

交通控制设备亦随着科技发展而循序渐进。最初，交通信号由机电装置驱动；随后，改用半导体元件；如今则普遍采用基于微处理器的交通控制系统。

自20世纪60年代以来，区域交通控制系统的发展带动了如计算机、通信和车辆检测等设备在交通控制中的应用。

自从第一台交通信号控制器问世以来，交通控制策略亦取得了长足的进展。不同的交通控制策略反映不同的特点，其重点体现在：

(1) 受实时交通数据影响的交通控制。体现这一特点的交通控制策略主要有两种：

- 1) 定周期 (FT) 策略。采用统计数据，事先计算交通控制方案。
- 2) 实时 (RT) 策略。通过实时处理交通数据确定和修改交通控制方案。

(2) 运行指数。常用的运行指数包括：

1) 单点交通控制。总延误（在指定时间间隔内，通常1个信号周期内，路口各个到达方向总延误之和）、停车次数、延误与停车次数的加权和、1个周期内各绿灯时长之和、1个周期内通过阻塞路口的总流量、交通事故数、周期长度等。

2) 干线交通控制。带宽,即有可能进入“绿波带”并连续通过若干路口无停车的时间间隔。

3) 多个路口的区域控制。区域内所有路口的总延误、区域内所有停车次数、区域内所有连线延误及停车次数的加权和、区域内所有车辆的总油耗、污染程度、噪声强度、交通事故次数等。

(3) 交通态势响应。根据这一特点,交通控制策略可分为:

1) 平峰策略。

2) 常态策略。

3) 区域阻塞策略。

4) 特殊策略(如公交优先,消防车路线优先等)。

同一交通控制系统中各子系统的功能分布。从这一角度,目前有两种策略:中心计算机集中运行所有交通控制系统功能;功能分解,一部分策略在路口基于微处理器的交通信号控制器中运行,另一部分由中心控制计算机执行。

区域性交通控制对交通组织的影响。这方面有两种策略值得关注:与交通信号控制相独立的交通组织策略;交通信号配置参数和交通流导向均可变的策略,该策略可以优化运行指数选择,并对交通组织施加影响。

交通控制及信息技术的发展,使得在现代城市中建立连接成百上千路口复杂交通控制系统的愿望变为现实,该系统可以协调多个路口控制子系统,这对于路网密集的区域尤为重要。

然而,仍有很多单点控制路口,即未被连接到具有干线“绿波”或区域协调功能的复杂系统之中。例如,在瑞典,60%以上的信号路口为单点控制。鉴于这种状况,自基于现代微处理器用于交通信号控制器问世以来,开发出专业的针对单点优化控制的算法显得尤其重要,即便单个路口已被连接到一个复杂的交通控制系统之中仍不例外。

单点优化控制是一个非常复杂的问题,尤其是该问题的综合特性。本书一开始就将单点优化控制视为一个综合性的复杂问题,并将其归纳为在一系列图上寻求最佳闭合路径的问题。

信号控制路口利用信号灯不同颜色(红、黄、绿)周期性循环变化进行交通控制,针对不同的交通流特性将信号周期分隔成不同的时间段,以防止相互冲突的交通参与者在某时间段同时获得通行权,以此避免交通冲突的发生。对一个时间段的控制被定义为一个控制向量(称之为“相位”),该向量作为控制变量通过信号灯进行交通控制。相互不冲突的多股交通流可以在同

一个时间内同时获得通行权。

设定相位变化顺序的必要性详见以下举例。如图 1 所示，在早高峰期间，由西向东通过路口的交通流远大于由东向西的交通流；而在晚高峰时段，由东向西的交通流量最大，并且左转车数量在这两个时段中明显相同（该举例类似于 Hank Van Zylén 参考文献 [92]）。

适合于这两个不同高峰时段的相序如图 2 所示。为左转车辆通行权的若干相位取决于需求。在图 2 (a) 中，向量 3、4、5 用于控制西侧到达的车辆；在图 2 (b) 中，向量 4、5、6 为东侧到达的左转车辆给出通行权。图 2 中的箭头表示为某交通流给出通行权，断头虚线表示某交通流未获得通行权。

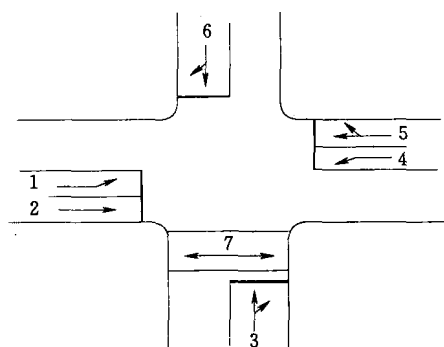


图 1

上述举例反映出实际问题的综合性，很明显，可能出现的控制向量系列比较多，确定控制向量系列间的关系、选择运行指数的量化值以及运行指数优化阈值所对应的控制向量系列是一个复杂的综合优化课题。

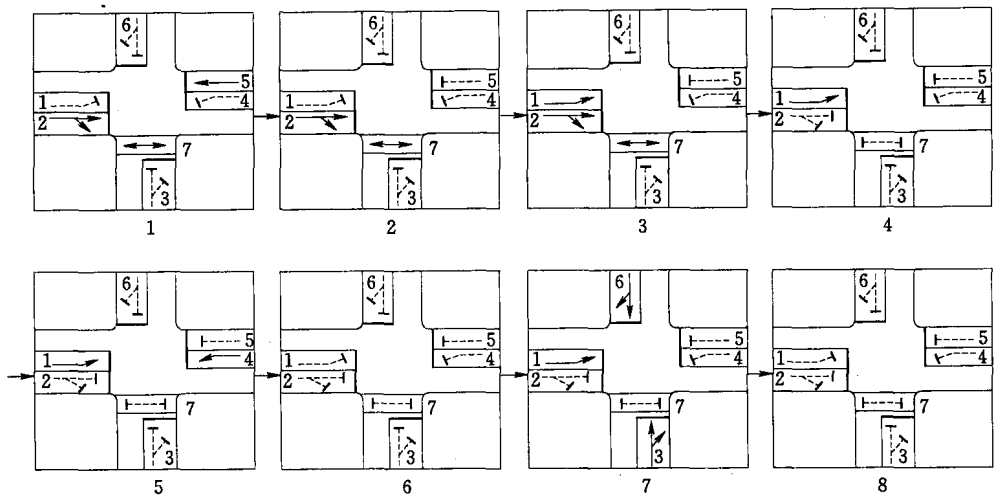
除了控制设备本身的研发以外，综合优化方法的研究亦是解决上述问题的必要条件。本书采用属于分支界定类的综合优化方法，以解决交通控制优化问题，该方法的研究最初始于 20 世纪 60 年代，见参考文献 [54] [56]。

单点路口交通控制综合优化方法由 Stoffers. K 通过引入交通流相容性关联图而建立。Stoffers 还指出，通过从相容性关联图上提取群组可以确定同时获得通行权的最大数量非冲突交通流的组合。图 1 所示路口的相容性关联图以及相容性关联图群组的完整图如图 3 所示。

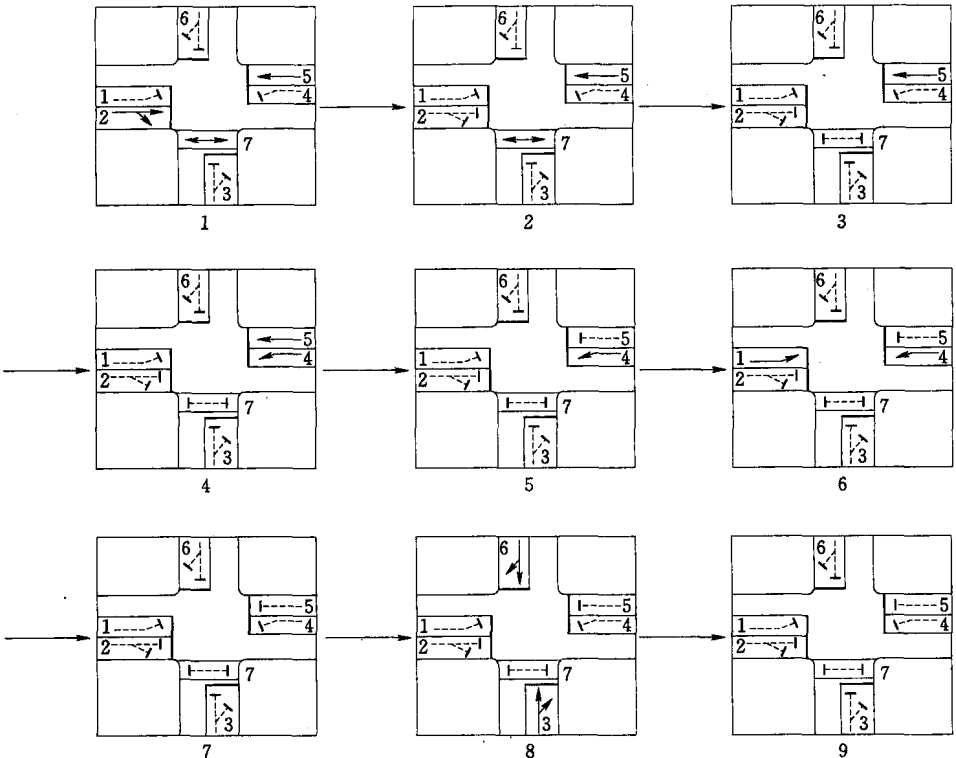
相容性关联图中的群组可用于确定实用性控制向量系列，然而，实用性控制向量信息并不足以确定其顺序。控制向量序列必须满足一定的条件，最重要的条件在于，在一个周期内，每一股交通流都必须获得通行权，并且任何交通流仅能获得一次。因此，针对交通流的各个交通控制向量必须依次给出通行权。如图 2 (a) 中，通过向量 3、4、5 给予交通流 1 通行权；通过向量 1、2、3 给予交通流 2 和 7 通行权。

只有找出绿灯相继显示与控制向量转换之间的关系才能准确阐明交通控制的问题，还有一系列仅与控制向量组合及顺序相关的约束，为此，引入“结构”作为反映控制向量序列的理念，控制向量的某实用性结构可以通过控制向量转换图上某一闭合路径表示。

优化控制问题可以通过控制向量转换图转化成优化闭合路径问题，为了



(a)



(b)

图 2

解决这一问题，开发出了分支界定类的优化方法，并通过所开发的计算机程序确定优化结构和对控制向量的周期时间优化分配。

控制向量转换图的引入和综合性优化方法的开发，使得一些为定义实用性交通控制系列所采用的不同运行指标或不同约束条件等优化交通控制问题

迎刃而解。

本书内容的具体编排如下：

第1部分。描述单点信号控制的动态处理过程。其数学模型的相关元素包括：输入空间、输出空间、状态空间、状态转换函数以及输出函数等，包括阐述非受控输入—随机到达交通流的数学模型。

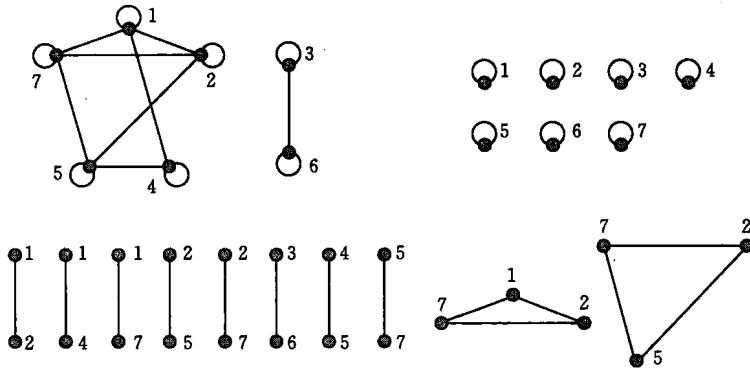


图3

本部分还介绍将指定到达方向的排队作为向量的分量进行状态定义及其状态转换函数，定义冲突与相容之间在输入系列中的关系，这些关系在阐述单点优化交通控制诸问题及寻求解决方案过程中十分重要。本部分还列出将信号组作为控制变量分配给各个交通流子集的相应公式，并定义了信号方案结构的理念，即信号方案为多个控制向量的一种顺序排列。

第2部分。将确定信号控制方案的问题归结成优化问题，定义了一系列约束条件和不同的优化目标，并给出以下约束条件相应的数学表达式：

- (1) 控制向量序列约束。
- (2) 信号组最小有效绿灯时间约束。
- (3) 信号组最大有效绿灯时间约束。
- (4) 流量均衡约束。
- (5) 最小绿灯间隔时间约束。
- (6) 一个周期内某信号组单个绿灯显示间隔约束。
- (7) 控制向量合成约束。
- (8) 控制向量持续时间之和约束。

第3部分。介绍不同优化目标的数学表达式。有关通行能力的优化目标包括：某交通流通行能力、信号组通行能力、整个路口通行能力、通行能力系数、指定交通流饱和度方差之和等，还给出了路口所有到达方向车辆总延误的数学表达式。通过对优化问题的求解确定信号方案各元素的极限值，在这

种情况下，其优化目标为：某信号组绿灯时间、周期时间及控制向量总数等。

第3部分是对第2部分公式化问题解题方法的深入探讨。该部分表明，在第2部分中所列的优化问题公式可以表示为在控制向量转换图中寻求最佳路径的问题，并通过研究基于分支界定算法使该问题得以解决。无论采用哪种优化目标，都可以以同样的方式，通过分支函数，划分出求解途径的集合。界定函数的定义取决于所选定的优化目标。

第4部分运用所研究的算法对第2部分所列问题进行求解，这些问题区别在于为确定实用性解决方案所参照的优化目标或约束条件。

第5部分分析信号组所有不同组合对路口运行的影响，并证明其影响非常明显。同时，建议了一种为选择信号组的不同组合的试探性方法。

原著者

2008年于贝尔格莱德

前言

译者

本书作者在交通控制领域具有多年的研究工作经验，作者在书中以详尽、细致的方式对其在交通控制优化方法及解决方案方面的研究成果进行了描述，能够帮助读者更透彻地理解交通控制基本原理和相关的综合治理措施，同时能够在交通控制最优化方法方面给予读者更深层次的启发。本书是作者在交通信号控制方面的一部力作，特色鲜明、可读性强，主要读者对象为交通控制研究、实施、管理人员。

交通信号控制是城市道路智能交通系统中的关键组成部分，目前国内关于交通信号优化控制基本理论和方法方面的书籍颇少，译者认为本书适合国内读者的需要，因此尽快将它奉献给了大家，通过本书的学习，读者可以更加深入的了解交通信号控制优化方法的形成过程及建模方法。本书重点关注单点路口本地控制的有关问题，是因为目前这些问题依然是令人关注的重点，相当多的单点路口仍然被视为存在交通问题的重要路口。

本书由北方工业大学智能交通控制研究所的教师及部分研究生翻译。参与翻译和审校的人员有张永忠、张福生、刘小明、王力、熊昌镇、李颖宏、陈智、刘文婷、张金金、凌利、刘乐敏等。在此特别感谢西门子（中国）有限公司 ITS 系统事业部李刚高级工程师在本书翻译、审校过程中给予的大力支持和帮助，本书的出版也得到了北京市科技计划项目《特大城市新一代智能交通管理技术研究》项目的资助。译者在此一并表示感谢。

本书可以作为交通运输类、自动控制类、系统工程类专业硕士生和博士生的课程教材，也可作为交通控制领域工程师研究交通优化控制方法的参考用书。

译者

2012年5月

目 录

原著序
原著前言
译者前言

第 1 部分 信号控制路口交通过程数学模型	1
1 信号控制路口动态过程基本数学描述	1
2 非受控系统输入	4
2.1 输入分量——交通流	4
2.2 到达交通流数学模型	5
2.3 多股交通流的基本关系	8
3 信号组	13
3.1 信号组定义	14
3.2 相同信号显示关系	15
3.3 完整信号组系列	16
4 交通控制	27
4.1 控制变量	28
4.2 交通控制—信号方案	30
5 排队——单点信号控制路口交通状态	34
5.1 状态定义	34
5.2 状态转换	35
6 输出函数	40

第 2 部分 交通控制问题阐述	43
7 交通控制问题简述 (信号方案选择)	43
8 实用控制集 (信号方案)	44
8.1 确定实用控制系列的约束	45
8.2 控制变量约束	46
8.3 实用控制向量系列	54
8.4 绿灯间隔时间约束	58
8.5 绿灯显示连续性关系	64
8.6 相位转换关系及其关联图	67

8.7	相位最小绿灯间隔时间约束	77
8.8	相位持续时间之和的约束	79
8.9	信号方案约束的数学表达式	79
9	优化目标	88
9.1	优化目标的基本形式与特点	88
9.2	优化目标类型	89
9.3	与通行能力相关的优化目标	91
9.4	路口延误	95
9.5	停车次数	98
9.6	信号方案参数	99
<hr/>		
第3部分	交通控制优化决策方法	101
10	在图 G_s 中寻求最佳闭合路径	101
11	通过图 G_s 寻求最佳闭合路径方法	102
11.1	函数 $J_s[u(\cdot)]$ 的张弛与扩展	102
11.2	排除目标	106
11.3	分支规则	107
11.4	边界规则	114
11.5	分支与界定的递归运算	115
<hr/>		
第4部分	交通优化控制决策 (信号方案)	120
12	优化通行能力	120
12.1	周期通行能力	121
12.2	路口周期通行能力最大化	122
12.3	机动车交通流饱和度均衡	133
13	延误最小化	143
13.1	已知周期时间的延误最小化	143
13.2	未知周期时间的延误最小化	146
14	信号参数规划的极端值	147
14.1	最大有效绿灯时间	147
14.2	周期时间最小化	148
14.3	周期时间最大化	149
14.4	信号方案结构长度极限	149
<hr/>		
第5部分	选择完整信号组系列对路口运行的影响	154
15	偏序关系 (细化) 与实用性控制系列	154
16	试探性选择完整信号组	155

附录 1 图与群组	169
1 X 和 Y 的笛卡尔积	169
2 集合 X 的二元关系 ρ	169
3 图的邻接矩阵	169
4 集合 X 的分集 $P(X)$	170
5 子图	170
6 部分图	170
7 群组 (按照 Berge 的思路 ^[9])	170
8 图 $G=(X, \Gamma)$ 的最大群组	171
9 路径、路径长度、距离	171
<hr/>	
附录 2 等价关系	172
1 等价关系	172
2 等价类	172
3 商集	172
<hr/>	
附录 3 CLIQ 和 MINA 的程序伪代码	173
1 CLIQ 程序代码	173
2 MINA 程序代码	173
<hr/>	
附录 4 明确关系与 HASSE 图	175
1 集合 X 的分解	175
2 明确关系	175
<hr/>	
附录 5 绿灯、红灯和绿灯间隔时间的有效值	176
1 有效绿灯和红灯时间	176
2 绿灯间隔时间有效值	176
<hr/>	
附录 6 确定控制向量转换图	180
1 确定实用性控制向量系列	180
1.1 确定 G_x 图的最大群组和最大控制向量系列	180
1.2 确定所有实用性控制向量系列	182
2 建立控制向量转换图 G_c	186
<hr/>	
附录 7 STECSOT 程序描述 (结构与周期时间分配优化技术)	188
1 程序结构	188
2 程序描述	188
2.1 主程序	188
2.2 START 子程序	188

2.3	BRANCH 子程序	188
2.4	VECTOR 子程序	189
2.5	CYCLE 子程序	189
2.6	CONDIT 子程序	189
2.7	CONSTR 子程序	191
2.8	LINPRO 子程序	192
2.9	PIKFO 子程序	192
2.10	SIMPLE 子程序	192
<hr/>		
附录 8	延迟函数凸显性证明	193
1	未知周期时间时延迟函数凸显性证明	193
1.1	延迟函数第二项凸显性检验	193
1.2	延迟函数第一项凸显性检验	197
2	未知周期时间时延迟函数凸显性证明	198
参考文献	200

第 1 部分 信号控制路口交通过程数学模型

信号控制路口的交通过程主要反映在随着排队的增长与消减使驶入流量被转化成驶出流量，因此，这是一个动态的过程。

根据系统基本原理（参考文献 [58]、[23]），可将以下目标与上述动态过程相关联：

- 输入空间 X （所有输入元素）。
- 输出空间 Y （所有输出变量）。
- 状态空间 W （所有状态变量）。

输入空间 X 和输出空间 Y 为两组时间函数，其元素 $x(\cdot)$ 和 $y(\cdot)$ 为所定义时域 $T \subseteq R$ 的时间向量函数，其中， $T = (-\infty, \infty)$ 或 $[0, \infty)$ 时，函数连续； $T = \{n\Delta t | n \in N\}$ 或 $T = \{n\Delta t | n \in N_+\}$ 时，函数离散。

状态过程为与时间 t 相关的向量系列，其分量均为实数。

动态系统的基本特点在于一旦给定某一初始时间 $t_0 \in T$ ，某一初始状态 $w_0 \in W$ 和某一输入值 $x(\cdot) \in X$ ，其 t 时间后的状态结果 $w(t)$ 与输出结果 $y(t)$ 都是唯一确定的，并且 $w(t)$ 和 $y(t)$ 的值仅取决于 $w = w(t_0)$ 及 $[t_0, t]$ 时间段的输入值 $x(\cdot)$ 。

因此，为了完整地描述某一动态过程，必须通过确定 $w(t)$ 和 $y(t)$ ，以定义其他所有函数。

1 信号控制路口动态过程基本数学描述

从 5 个方面对信号控制路口的动态交通过程进行完整的描述 ($X, W, Y, \varphi^1, \varphi^2$)。

输入元素 X ，由系统中未受控输入部分，即交通流；以及影响交通过程的控制输入部分，即控制输入组成。交通流受由控制变量控制的交通信号影响，因此，输入可以以序偶组的形式进行描述：

$$X = U' * \Sigma \quad (1.1)$$

设 U' 为控制系列，即各个向量：

$$u'(\cdot) = (u'_1(\cdot), u'_2(\cdot), \dots, u'_p(\cdot))$$

控制向量 $u'(\cdot) = \{u'(t) | t \in T\}$ 为一个周期性时间函数，该函数表述交通信号的变化过程（如绿、黄、红、红/黄——一种许多国家都通用的目标信号序列）。该过程的基本部分，即形成循环往复的最小过程被称之为控制周期，亦常称为周期，其持续时间 c 则被称为周期持续时长或周期时间。

鉴于控制元素 $u'_p(\cdot)$ 是一个时间周期函数，则：

$$u'_p(t) = u'_p(t + kc), \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, p = 1, 2, \dots, P) \quad (1.2)$$

一个控制变量的值可以假设为 0 或者 1，当值为 0 时红灯亮（有效红灯），当值为 1