



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

提升道路通行能力时空协同优化控制 理论与方法

姓 名：赵靖

学 号：1110623

所在院系：交通运输工程学院

学科门类：工学

学科专业：交通运输规划与管理

指导教师：杨晓光 教授

副指导教师：

二〇一四年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

**Urban Streets Capacity Enhancement by
Coordination Optimization of Lane
Reorganization and Signal Control**

Candidate: Jing Zhao
Student Number: 1110623
School/Department: School of Transportation Engineering
Discipline: Engineering
Major: Transportation Planning and Management
Supervisor: Prof. Xiaoguang Yang

May, 2014

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

城市交通拥堵被认为是世界性的难题,并日趋严重。与此同时,由于城市土地资源十分有限,诸多城市,特别是大城市的道路基础设施建设已接近饱和。因此,如何通过科学的道路交通控制管理措施,挖掘现有道路交通资源的潜力,适应人们日益增长的出行需求,是交通研究人员面对的严峻挑战。本文基于时空协同优化的思想,从节点、连线、通道和网络等不同层面,对于信号控制和道路空间的交通流通行权控制理论进行了深入探讨,建立了一系列提升道路通行能力的方法。

道路空间条件与交通控制条件是相互影响的,两者互为条件,在优化过程中有着极强的相关性。但由于道路空间条件在整个道路交通系统中是一个相对稳定的部分(慢变量),而信号控制相对而言是一种更易改变的参数(快变量),因此以往主要在设计阶段优化道路的空间布置,在控制管理阶段则将其作为输入条件,主要注重对交通流通行权在时间上的调整。但从系统角度分析,若将道路空间条件也纳入优化控制体系中,能使信号控制取得更好的效果。本文将交通流在道路空间和时间上的通行权分配问题纳入到统一的研究框架内,针对提升道路通行能力这一目标,研究其协同优化控制问题。

在节点层面,传统的优化步骤一般依次确定允许及禁止流向、进出口车道、各进口车道功能、和信号配时参数。本研究基于车道控制理论,针对上述步骤,自下而上逐步提出空间结构与信号控制相结合的协同优化控制方法,分别形成车道功能动态控制、出口车道动态控制和基于中央分隔带掉头的交叉口流向控制三种时空协同优化控制方法。并分别建立了(非)线性混合整数规划模型。通过算例及仿真分析,对其交通运行效益及适用条件分别进行了评价。

在连线和通道层面,由于增加了路段要素,因此除了考虑沿线交叉口的流向管理、车道方向、车道功能和信号配时之外,重点对路段车道的优化布置进行了研究。从可逆车道的动态使用和可逆车道与其它交通管理措施的组合使用两个角度,分别针对交叉口连线和通道,形成基于动态可逆车道的连线交通控制和基于可逆车道的干道交通优化控制两项时空协同优化控制方法。并分别建立了(非)线性混合整数规划模型。通过算例及仿真分析,对其交通运行效益及适用条件分别进行了评价。

在网络层面,由于研究范围的扩展,诸如转向禁止、冲突点消除、可逆车道和单向交通等交通组织策略的组合更为多样,相互关系也更为复杂。研究从多种交通组织策略的组合优化和针对转向交通的动态控制两个角度,形成两项时空协

同优化控制方法，并分别建立了双层规划模型和线性混合整数规划模型。通过算例分析，对其交通运行效益及适用条件进行了评价。

研究从中微观层面，建立了空间变量（路段各方向车道数量、交叉口转向禁止、车道功能）和时间变量（信号相位、相序、周期、绿信比、相位差）的组合优化模型，并基于算例、仿真及驾驶模拟实验评价，构筑了提升通行能力的道路交通流通行权时空协同优化控制理论与方法。

关键词：通行能力，协同优化，车道控制，信号控制，非线性规划，双层规划

ABSTRACT

High traffic demand coupled with unbalanced directional flows on roadways exacerbates the perennial problem of congestion, which has been one of the most depressing and challenging problems throughout the world. How to efficiently utilize the existing transportation network has been one of the most important issues faced by transportation professionals as congestion on roadways in the cities continues getting worse and the land for road construction is limited. In this paper, a series of capacity enhancement control methods for urban streets have been proposed based on the coordination optimization of lane reorganization and signal control concept. They are discussed from three different levels, including node, arterial, and network.

The roadway capacity is affected by both geometric design and signal-timing design. Since the geometric design is a more stable component in a traffic control system, its construction is harder to be varied than flexible parameters such as signal settings. Therefore, engineers have been engaged in more researches on the development and implementation of traffic signal control methods, which is called the “time management” method. However, from the system analization point of view, the geometric element should be integrated into the unified optimization framework to obtain a better control result. In this paper, a series of integrated optimization model are proposed to discuss the right-of-way assignment for traffic flow on time and space. They aim to address the following critical question that has long challenged transportation authorities during traffic management, namely: given the target transportation network and demand distribution how to select the most appropriate scheme of the reorganization of lane configurations and signal timings to enhance the facility capacity.

In the node level, the conventional optimization procedure is determining the following parameters step by step, including the permission of the movements, the layout of approach lanes and exit lanes, the lane assignment, and the signal timing. For each step, an alternative design is proposed to simultaneously optimize the geometric design and signal timing. They are dynamic lane assignment model, the exit-lanes for left-turn (EFL) control model, and the median u-turn intersection (MUTI) optimization model. These optimization models could be formulated as linear or non- linear programmings. Furthermore, their performances are evaluated through

both numerical analysis and VISSIM simulation.

In the link and arterial level, the research focuses on the optimization assignment of lanes in segment. Two coordination optimization methods are proposed: operation of closely joined intersections using dynamic reversible lane control, and integrated design and operation of urban arterials with reversible lanes. The two optimization models could be formulated as a mixed integer linear programming and a mixed integer non-linear programmings, respectively. Moreover, the performances of the integrated models are evaluated through both numerical analysis and simulation.

In the network level, since the research scope is further extended, the combination of traffic management strategies, such as lane reversal, one-way street, turning restriction, and crossing elimination strategy, are more diversified and complex. Two optimization methods are proposed: network enhancement model with integrated lane reorganization and traffic control strategies and dynamic turning restriction control. The former could be formulated as a bi-level structure with a mixed integer non-linear programming problem at the upper-level, which aims to maximize the reserved capacity for the given network, and a parametric variational inequality at the lower-level, which specifies the destination distribution and route choice behaviors. And the latter could be formulated as a mixed integer linear programming. Moreover, numerical analyses are conducted to evaluate the performance the proposed model.

This paper proposes a coordination optimization method with the objective to enhance network capacity relieve congestion. The main idea is to intergrate the space elements, including number of lanes on each link, the permission of movements at intersections, lane-use assignment, etc, and the time elements, including phase plan, cycle length, green time ratio, offset, etc, in a unified framework and optimize simultaneously. The results of extensive numerical analysis and simulation show that these control methods could squeeze more capacity out of a road network and utilize the existing infrastructure more efficiently.

Key Words: Capacity, Coordination Optimization, Lane Reorganization, Signal Control, Non liner programming, Bi-level programming

目录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 现实背景.....	1
1.1.2 理论背景.....	2
1.2 课题来源.....	3
1.3 研究目的与意义.....	3
1.3.1 研究目的.....	3
1.3.2 研究意义.....	4
1.4 文献综述.....	5
1.4.1 道路交通设计.....	5
1.4.2 交通信号控制.....	13
1.4.3 组合优化.....	16
1.4.4 综合评述.....	17
1.5 研究定位、内容和技术路线.....	17
1.5.1 研究定位.....	17
1.5.2 研究内容.....	18
1.5.3 技术路线.....	18
1.6 本章小结.....	20
第 2 章 时空协同优化控制基础问题	21
2.1 优化基本目标.....	21
2.2 控制基本对象.....	22
2.3 优化建模方法.....	23
2.4 本章小结.....	26
第 3 章 节点时空协同优化控制	27
3.1 概述.....	27
3.2 动态车道功能优化.....	28
3.2.1 基本概念.....	28

3.2.2 优化模型.....	29
3.2.3 算例分析.....	37
3.2.4 小结.....	40
3.3 出口车道动态控制.....	40
3.3.1 基本概念.....	40
3.3.2 优化模型.....	42
3.3.3 算例分析.....	46
3.3.4 驾驶模拟分析.....	51
3.3.5 实际应用讨论.....	61
3.3.6 小结.....	62
3.4 基于中央分隔带掉头的交叉口流向控制.....	63
3.4.1 基本概念.....	63
3.4.2 优化模型.....	64
3.4.3 算例分析.....	70
3.4.4 小结.....	75
3.5 本章小结.....	76
第 4 章 连线及通道时空协同优化控制	77
4.1 概述.....	77
4.2 基于可逆车道动态控制的连线交通优化.....	78
4.2.1 基本概念.....	78
4.2.2 优化模型.....	82
4.2.3 算例分析.....	86
4.2.4 小结.....	91
4.3 基于可逆车道的干道交通优化控制.....	92
4.3.1 基本概念.....	92
4.3.2 优化模型.....	93
4.3.3 算例分析.....	99
4.3.4 小结.....	108
4.4 本章小结.....	109
第 5 章 网络时空协同优化控制	111

5.1 概述.....	111
5.2 基于多种交通组织策略组合的网络交通优化.....	111
5.2.1 网络描述.....	112
5.2.2 优化模型.....	114
5.2.3 算例分析.....	119
5.2.4 小结.....	126
5.3 基于转向禁止动态控制的网络交通优化.....	127
5.3.1 基本概念.....	127
5.3.2 优化模型.....	128
5.3.3 算例分析.....	133
5.3.4 小结.....	144
5.4 本章小结.....	145
第 6 章 结论与展望	147
6.1 结论.....	147
6.1.1 主要研究成果.....	147
6.1.2 主要创新点.....	147
6.2 进一步工作的方向.....	148
致谢	149
参考文献	151
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	165

第1章 引言

1.1 研究背景

城市交通拥挤问题被认为是世界性的难题，并随着城市机动车数量的增长，日趋严重。与此同时，由于城市土地资源十分有限，诸多城市，特别是大城市的道路基础设施建设已接近饱和。鉴于城市道路交通是城市综合交通体系最为关键的基础，支撑着人和物的门到门移动和多方式交通的换乘，故本研究试图通过科学的道路交通控制管理措施，挖掘现有道路交通资源的潜力，适应人们日益增长的出行需求。

1.1.1 现实背景

城市交通拥挤问题产生的根源是交通供给与交通需求的不平衡。随着经济与社会的高速发展，城市交通机动化速度迅速加快，然而交通土地资源相对紧张。在这种条件下，科学合理的规划、建设和管理城市道路交通系统是缓解交通拥挤的关键。

长期以来，对城市道路交通系统的建立是按规划（空间布局）-设计（空间优化）-管理控制（时间优化）这个流程进行的。首先通过道路基础设施的调整和完善建立合理的路网结构；然后对现有交通系统及其设施加以优化设计，针对特定问题，寻求改善交通的最佳方案，精细化地确定交通系统及其构成要素；最后确定交通的通行权、通行时间与空间及其管理方案。在此过程中，道路几何条件是交通控制的一项必要的输入参数。

然而，在实际操作中，难以保证提供给交通控制的道路空间设计是最合理的，传统的城市道路交通优化方法往往基于大量的经验和反复的尝试，优化成果一般仅仅是一个可行的方案。并且各种交通管理策略（可逆车道、单行线、流向禁止等）之间，以及其与交通控制都存在相互影响关系，忽略它们之间的关联性也将导致优化结果为非最优方案。

此外，道路交通系统中随机因素的扰动（如大型活动、交通事故、紧急救援交通等），可能造成交通需求的激增或设施通行能力的衰减，显著改变相关区域交通供需关系，使原本就脆弱的道路交通系统运行状况进一步恶化。这种交通供需的结构性不匹配仅仅通过信号控制等时间优化措施常难以有效快速应对。

为了充分利用现有的道路交通资源，同时快速应对交通需求的随机性，有必

要引入时空协同优化的概念,即对道路交通系统进行的优化控制不局限于通过信号控制来调整时间资源的分配,道路空间结构也作为可优化参数,同时从空间和时间两个角度综合考虑,基于交通供需条件,对交通流的通行权进行系统优化和调整,实现网络时空资源的最佳利用。这也是本文研究着重提出以通行能力为目标,对城市道路交通进行时空协同优化的出发点。

1.1.2 理论背景

道路交通系统优化问题是一个资源(通行权)分配优化问题,供分配的资源包括空间资源和时间资源,前者主要体现为道路几何条件,后者主要体现为交通控制条件。因此,城市道路交通系统优化理论研究本身可分为道路交通设计和道路交通控制两大部分。

交通设计的学术思想在形成之初主要体现在道路几何设计之中,随着理论体系的不断完善,现已作为一个独立概念被提出,并成为一项被高度重视的改善城市交通的方法和技术。特别是在我国其创新性、科学性及体系性得到了长足的发展(杨晓光,2003;杨晓光等,2010)。城市道路交通设计作为其中一项重要组成部分,其研究内容主要包括交通网络设计与优化、节点及接入交通设计、公交优先设计、交通语言系统设计、动静交通协调设计、慢行交通系统设计等方面。设计方案一般包括车道位置、车道数、车道功能、车道长度、车道宽度等空间参数,且不断向精细化设计方向发展。道路交通设计的研究成果对于揭示交通系统要素、优化目标和约束条件之间的有机关系,分析道路空间要素的高效利用方法,起到了十分重要的作用。

交通控制,这里主要指交通信号控制,早在19世纪人们就开始对其进行研究,用信号灯指挥道路上的车辆交通,控制车辆出入交叉口的次序(全永燊,1989)。发展至今,已形成了较为完善的理论体系。按控制策略,可分为定时控制策略、感应控制策略和自适应控制策略;按控制范围,可分为单点信号控制、线控和区域控制(FGSV,2006;吴兵和李晔,2009)。信号控制最终方案主要包括相位相序、周期时长、绿信比和相位差这四个基本的时间参数(高云峰,2007)。交通信号控制的研究成果对于交通流的通行权在时间上安全、高效地分配提供了理论基础。

道路空间条件与交通控制条件是相互影响的,两者互为条件,在优化过程中有着极强的相关性。但由于道路空间条件在整个道路交通系统中是一个相对稳定的部分(慢变量),而信号控制相对而言是一种更易改变的参数(快变量),因此以往主要在设计阶段优化道路的空间布置,在控制管理阶段则将其作为输入条件,

主要注重对交通流通行权在时间上的调整。但从系统角度分析,若将道路空间条件也纳入优化控制体系中,能使信号控制取得更好的效果。由此,为了寻求最优的方案,最大限度地挖掘现有道路资源的潜力,促使学者(Lam et al., 1997; Wong and Wong, 2003a; Wong and Heydecker, 2011)从组合优化(Integrated Optimization)的角度,将交通流在道路空间和时间上的通行权分配问题纳入到统一的研究框架内,在一个更大的可行域范围内寻求最优的方案。本文在这样的理论研究背景下,着重针对提升道路通行能力这一目标,研究时空协同优化控制问题。

1.2 课题来源

本论文的研究是基于以下三个研究课题而展开的。

1. 国家自然科学基金资助项目——“演变中的现代城市道路交通系统集成设计基础理论与方法(51238008)”。该项目针对低密度向高密度、非机动化向机动化演变的现代城市道路交通系统集成优化设计基础问题展开研究,交通系统集成设计基本概念和集成技术是该项目需要研究的关键技术之一,设计与控制一体化及其有机性的把握是其中一项重要的研究内容。

2. 上海市科学技术委员会科研计划项目——“上海市城市道路通行能力计算方法与示范应用(12231201500)”该项目针对上海市道路,建立一套通行能力研究方法,为本研究的优化理论提供依据和技术支撑。

3. 国家高技术研究发展计划(863 计划)——“特殊需求下区域交通协同管控技术(2011AA110305)”。该项目面向交通需求处于特殊状态、交通供给处于特殊状态和运行环境处于特殊状态三种情形,基于网络化信息环境与条件进行交通管控技术的研究,实现特殊需求下交通控制效果最佳化。特殊需求下交通时空协同控制技术是其中一项重要的研究内容。

1.3 研究目的与意义

1.3.1 研究目的

城市道路拥堵问题的日趋严重,如何高效利用现有道路资源,最大程度地满足人们的出行需求,是交通研究人员追求的重要目标之一。本文基于时空协同优化的思想,从节点、连线、通道和网络等不同层面,对于信号控制和道路空间的交通流通行权控制理论进行探讨,建立一系列提升道路通行能力的方法,具体包

括：

1. 探寻可行方案——针对城市道路交通系统，将空间资源和时间资源（交通设计和信号控制）组合在一个统一的框架下，探寻可行的时空优化组合。
2. 建立优化模型——从交通的角度将需要解决的实际问题表述为数学模型，并通过对其求解，寻找最优方案。
3. 评价优化结果——通过大量的算例和仿真试验，对各影响因素进行敏感性分析，对时空协同优化方案的适用性进行评价。
4. 提出建议措施——结合实际应用需求，给出对策措施或实施建议。

1.3.2 研究意义

1. 理论意义

追求最优目标是人类的理想，最优化问题就是从众多可能方案中选择最佳者。本研究试图在以往交通设计和信号控制理论的基础上，在以下几个方面有所突破。

（1）突破分隔的设计方法，将控制变量组合考虑——以往一般将城市道路的空间优化设计和时间优化设计分成两个阶段进行，这样的划分虽然在操作层面使建设部门和管理部门有了较为清晰的工作范畴，但从理论层面，两者具有极强的相关性，打破两者的隔阂，更利于统筹优化的实现，因此有必要进行协同优化。

（2）突破经验的设计方法，将优化过程模型表述——由于以往的道路交通设计的主要依据是上位的规划条件，而对后续管理控制措施缺乏细致周密的信息，因此与控制相关的设计参数一般只能依靠设计人员的经验或采用通用的设计方法确定。本文通过定量化的方法，对设计参数建立数学模型进行求解，为参数的确定提供了科学的依据。

（3）突破普适性的设计方法，将空间资源灵活利用——传统的空间和时间分隔的设计方法往往造成道路几何设计偏向保守，以保证设计成果在后续控制阶段具有更广泛的适应性。时空协同优化的思想，为优化过程提供了更多的可调整参数，为优化问题提供了更广泛的可选择的方案，有助于根据实际交通需求条件，制定个性化的优化方案。

2. 实用价值

交通问题的普遍性和复杂性不言而喻，无论在认识论上还是寻求对策方面，人类所作出的努力由来已久。然而，我们所面临的挑战仍是严峻的，通过本文的研究希望能为改善城市道路交通的实际运行状况提供帮助。

（1）提供交通管理经济可行的优化方案——城市交通的拥堵问题往往更多地集中在土地资源紧张的大城市，道路基础设施建设已接近饱和，这种情况下，

更显示出对道路资源的集约化利用,挖掘现有道路资源潜力的必要性,本文的研究中所提出的一系列经济可行的方案,可为管理部门提供更多的选择。

(2) 缓解城市道路日益严重的拥堵状况——城市道路拥堵问题是交通问题中最核心、最直观的问题,本研究通过将提高道路通行能力作为主要的优化目标,使得优化方案能对交通需求具有更广泛的适应性,提高道路对交通的供给能力,从而缓解城市道路日益严重的拥堵状况

(3) 提高城市交通应对需求变化的适应能力——随着城市活力的和城市功能的不断增强,交通需求的波动性成为影响城市道路运行状况的重要因素,本研究突破以往单单依靠信号控制进行调整的局限性,能为应对交通供需关系发生显著变化的情况提供更快速有效的应对方法。

1.4 文献综述

本文所关注的道路交通时空协同优化问题的特点是从控制角度出发,将道路交通空间结构这类以往主要由上位道路设计确定的参数,也作为控制阶段可优化的变量。因此,以往关于道路交通空间设计和信号控制的研究成果是本研究的基础,后文将根据所查阅资料,分别对道路交通空间设计、交通信号控制和组合优化的研究现状及发展动态作一综述。

1.4.1 道路交通设计

道路几何设计是早期城市道路研究的重点,在交通设计理论形成之初,其学术思想和主要研究内容主要包含于道路几何设计之中。早在1912年,美国工程学科的教科书中就讨论了道路几何设计的基本原理(白玉,2004; Fambro et al., 2000; 曾滢,2010)。1940年, American Association of State Highway Officials (AASHO, 后更名为现在的 American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 正式制定了第一部道路几何设计规范,后经多次修订,形成了具有广泛影响力的设计手册《A Policy on Geometric Design of Highways and Streets》(Green Book) (AASHTO, 2011)。其中对不同等级道路机动性(Mobility)与可达性(Access)的考虑、进出交通的管理与控制(access control and access management)、渠化设计(channelization)、交叉口禁向管理(indirect left turns and u turns)等方面早已不是传统道路设计所涵盖的内容,而是交通设计思想的体现。此外,如加拿大的《Geometric Design Guide for Canadian Roads》(TAC, 1999)、英国的《Design Manual for Roads and Bridges》(Highway Agency, 2008)、

澳大利亚的《Guide to Road Design》(Austroads, 2006)、日本《道路の計画と設計》(武部健一, 1988)等国家的道路设计手册中均有涉及渠化设计(channelization)、左转车道设置(left-turn lanes)、车道数平衡(lane balance)等体现交通设计思想内容。随着交通设计理论体系的不断完善,现已作为一个独立概念被提出,并成为一项被高度重视的改善城市交通的方法和技术。其中,关于提高城市道路交通运行效率的研究主要包括以下几个方面。

1. 交叉口节点交通设计

交叉口是道路通行能力的瓶颈,往往制约整条道路乃至路网的服务水平。交叉口交通设计是从微观角度,通过路段和交叉口进口道、进口道和出口道、出口道和路段通行能力的有效匹配设计,以及进出口道和交叉口内部各类交通流渠化设计,在实现通行安全和有序的前提下,达到交叉口通行效率最大化。其研究可以分为常规交叉口设计和非常规交叉口设计两个层面。

常规交叉口交通设计主要是针对一般的交叉口通行规则,对交叉口的各组成部分进口优化设计。研究内容包括:交叉口设计模式(杨晓光, 2003; 白玉, 2004; 杨晓光等, 2010; 赵靖和赵广福, 2010)、交叉口渠化(Neuman, 1985; Tarawneh and McCoy, 1996; Gowri and Sivanandan, 2008)、左转交通设计(Oppenlander and Oppenlander, 1989; 王京元和庄焰, 2007; Yu et al., 2008)、右转交通设计(Lin, 1985; Oppenlander and Oppenlander, 1989; McCoy et al., 1994; Fitzpatrick et al., 2006; Kikuchi and Kronprasert, 2008)、掉头交通设计(Zang et al., 2009; Kong et al., 2011)、交叉口车道功能划分(王京元和王炜, 2007; 赵靖和郁晓菲, 2007; Zhong et al., 2008; 梁潇, 2008; 李丽丽等, 2009; 曾滢, 2010)、交叉口视距(Harwood et al., 1996; Easa, 2007; Ali et al., 2009)、停车线设置位置(彭国雄, 1988; 白玉等, 2004; 黎冬平和陈峻, 2005)、车道宽度(Khattak et al., 2004; 杭州市综合交通研究中心, 2006; Potts et al., 2007)、非机动车与行人(孙明正, 2003; 景春光, 2005; 杨晓光等, 2012; 赵靖等, 2012)、环形交叉口设计(AUSTROADS, 1988; FHWA, 1997a; Waddell, 1997; Flannery, 2001; 汪涛, 2007)等。

非常规交叉口设计主要是应对交叉口拥堵的情况,从提高交叉口通行能力的角度提出的一系列特殊的设计方法,主要有以下几种类型。

(1) 左转交通远引(indirect left-turn treatment)。这可以通过多种方式实现,如图 1.1-1.4,包括基于中央分隔带掉头交叉口(median u-turn)、壶柄型交叉口(jug-handle)、超级道路交叉口(superstreet)、蝴蝶结型交叉口(bowtie)等(Hummer, 1998a, b; Hummer and Reid, 1990; Associates, 2008; Hughes et al., 2010)。这些交叉口设计方案具有一个共同的特点,都试图禁止交叉口的某个或