

城市混合交通控制设计理念与方法

Ideas and Methods for Mixed Urban Traffic Control

王殿海¹ 金盛¹ 宋现敏¹ 汪志涛²

(1. 吉林大学交通学院, 长春 130025; 2. 青岛海信网络科技股份有限公司, 青岛 266071)

Wang Dianhai¹, Jin Sheng¹, Song Xianmin¹ and Wang Zhitao²

(1.College of Transportation, Jilin University, Changchun 130025, China; 2.Qingdao Hisense Network Technology Ltd., Qingdao 266071, China)

摘要: 针对我国城市特有的混合交通特性,在分析城市路网特征和交通流运行特征的基础上,确立了混合交通控制系统设计的基本理念。基于混合交通流理论,建立了城市交通控制的方法体系,包括匝道控制、单点控制、干线协调控制、区域协调控制以及公交优先控制。运用此设计理念与方法开发出的混合交通控制系统(HiCON),在北京、青岛、福州三地的应用表明:车辆平均延误减少10%~20%,平均行程时间降低5%~10%。

Abstract: Regarding the exclusive characteristics of mixed traffic in China, this paper offers some ideas to design scenarios for mixed urban traffic control after analyzing the characteristics of urban networks and traffic flow. Based on mix-flow theories, the paper establishes a system, namely HiCON, of urban mixed traffic control, including ramp metering, single-point control, coordinated arterial and regional control, and transit priority control. Implementations of HiCON in Beijing, Qingdao, and Fuzhou, respectively, have shown promising results: 10-20% reduction of delay, and 5-10% reduction of travel time, both for vehicles and in average.

关键词: 交通管理; 交通控制; 混合交通; 设计理念; 控制方法; 机非冲突

Keywords: traffic management; traffic control; mixed traffic; design ideas; control methods; conflict between vehicles and bicycles

中图分类号: U491.2*62

文献标识码: A

收稿日期: 2007-12-05

作者简介: 王殿海, 男, 博士, 吉林大学交通学院教授, 博士生导师, 主要研究方向: 交通控制、交通流理论。

E-mail: wangdianhai@sohu.com

我国正处于城镇化和机动化双重发展的高潮期,城市交通问题已经成为制约城市发展的瓶颈^[1]。缓解城市交通拥挤,创造一个健康有序可持续发展的城市环境是摆在政府面前的一道难题。采用先进的城市智能化交通管理手段已成为必然趋势,其中智能化的城市交通控制系统更是重中之重。由于我国混合交通流特性与国外差别很大,许多城市引进的国外先进的交通控制系统(如SCOOT、SCATS等)并未产生预期的应用效果,建立起适应于我国实际交通状况的城市交通控制系统显得尤为迫切。本文探讨了城市混合交通的控制策略与控制方法。

1 城市交通特征分析

城市交通特征可分为静态的城市路网特征和动态的交通流运行特征。对城市交通特征进行深入的分析,剖析其内在规律是进行混合交通控制系统设计的前提和基础。

1.1 路网特征分析

我国城市道路类型分为快速路、主干路、次干路和支路,不同的路网等级其交通流特性和区域交通地位不尽相同。根据路网分级情况,将城市区域的交通控制层次划分为快速路匝道、战略交叉口、战术交叉口和一般交叉口控制。

① 快速路匝道是快速路与城市路网连接的通道,主要承担着快速路车流的汇集和疏散功能。通过匝道控制可以有效改善快速路的交通状况,提高城市大区域交通转移的效率,进而带动整个城市交通的改善。

② 战略交叉口指交通强度大且能反映区域交通特点的主要交叉口,一般为主干路和主干路相交的节点以及部分复杂交叉口。战略交叉口能够代表城市交通的特点,对交通控制效果起着关键性的作用。

③ 战术交叉口指交通强度较大且在协调控制中起重要作用的交叉口，一般为主干路和次干路相交的节点以及部分复杂交叉口。战术交叉口的地位比较重要，对交通控制效果有着明显的影响。

④ 一般交叉口指支路和主干路或次干路相交，应采用信号控制的交叉口，一般地位不重要，处于从属地位。

对路网分级后，可以根据不同的控制层次采用不同的信息采集手段和控制策略。

1.2 交通流运行特征分析

混合交通是我国城市交通的显著特征。机动车、非机动车、行人相互干扰严重，在交叉口尤其突出，这是交叉口运行秩序混乱的主要原因。混合交通使交叉口饱和流量和通行能力显著降低，现有信号配时不能充分利用，这是国内外现有系统不能充分发挥作用的根本原因之一。

在我国尽管城市混合交通现象普遍存在，但交通流仍然具有明显的规律性，具体表现在3个方面：

① 时间性 交通流一天内的变化具有很强的时间分布规律，有高峰、平峰和低峰3个阶段，且呈周期性变化。一周内的交通流变化也存在明显的时间分布规律，工作日与非工作日之间以及工作日每天之间都存在差别。

② 系统性 交通流的生成具有很强的聚集特征，其聚集过程为从街巷到支路再到干路，表现出显著的系统性，城市中所有的交通流是一个统一体。

③ 相关性 交通流的相关性主要表现为时间相关性、空间相关性和事件相关性。时间相关性指所有交叉口的交通状态随时间的变化规律具有相似性；空间相关性指某些交叉口的交通状态变化具有很强的 consistency，变化过程极其类似；事件相关性指交通流点线面运动的相关性。

2 混合交通控制系统设计理念

在归纳我国城市交通特征和内在规律的基础上，提出了适合我国交通特性的控制系统设计理念。

1) 直面混合交通

由于没有充分考虑我国混合交通状况，国外交通控制系统不太适应我国城市交通。因此，交通控制系统的研发设计必须以混合交通流理论和混合交通控制理论为依据，立足我国混合交通的现实。

2) 面控兼容线控和点控

为了保证系统的灵活性，便于系统扩充和升级，系统

框架应采取面控制兼容线控制和点控制的策略：以面控制为系统设计对象，将线控制和点控制统一到面控制中。

3) 合理布设检测器

我国大部分城市经济条件尚不允许布设大量的检测器，且存在检测器容易损坏而造成信息不全的问题。因此，采取以战略交叉口为核心、战术交叉口为补充、简单考虑一般交叉口的检测器布设策略，根据交叉口交通信息的相关性，利用已有的交通数据推测未知的交通数据。既能满足控制系统的需求，又能减少检测器的数量。

4) 灵活设计信号机类型

为了实现“小主机大控制”的设计思想，需要增大信号机的功能，使一台信号机可以作为一个区域控制服务器同时控制多个交叉口。将上级控制机的部分功能下移，加大信号机的控制功能和数据处理功能，以适应交通流的实时变化及满足公交优先控制的需要。

5) 数据分级处理

“小主机大控制”的设计思想还要求系统采取数据分级处理的策略。

① 中央控制服务器 主要负责整体控制区域的交通状态预测、交通状况分析及宏观数据的发布，同时将微观预测的数据下载给区域控制服务器。

② 区域控制服务器 根据中央控制服务器微观交通状态预测的结果，优化控制方案，将最终优化方案下载给信号机；同时将控制子区内所有信号机上载的交通信息汇集完整以后，集中上载给中央控制服务器。

③ 信号机 负责处理检测器数据，并将数据上载给区域控制服务器；根据需要，执行单点优化控制、单点感应式控制和公交优先控制方案。

6) 通信方式因地制宜

系统不应局限于有线通信，应因地制宜地采用无线通信和有线通信相结合的方式。以有线通信方式为主，在经济条件允许时能够提供丰富的接口，兼容各种通信方式。

7) 方案实时生成与实时选择相结合

为了充分体现系统的统一性，保证控制方案的稳定性和灵活性，系统应采用方案实时生成与实时选择相结合的策略，集中方案生成和方案选择各自的优点。

① 周期时长实时选择 为了保证控制方案运行的平稳性，周期时长应采取实时选择的方式。依据交通强度模型建立周期时长与交通强度对应关系，区域控制服务器根据中央控制服务器下载的微观交通预测信息，自动进行优化选择。

② 绿信比和相位差实时生成 为了保证控制方案运行的灵活性，绿信比和相位差应采取实时生成的方式。区域控制服务器内置绿信比和相位差的生成算法，系统根据中央控制服务器下载的微观交通预测信息和信号机上载的交通信息，自动优化生成绿信比和相位差。

3 混合交通流特性研究

以往对混合交通流理论的研究没有面向交通控制系统，其相关结论不能作为混合交通控制系统的依据。因此，需要针对实际交通控制系统的需求分析混合交通流特性，并以此为基础确定控制系统的关键参数。

3.1 非机动车基本特性

非机动车基本特性主要包括交叉口自行车到达与释放规律、速度分布规律、交通流基本参数模型以及机非冲突规律等^[2,3]，这些研究为混合交通控制奠定了理论基础。

3.2 机非饱和流率

交叉口的通行能力、信号配时的主要参数都需要基于饱和流率。饱和流率的标定对整个交通控制系统的控制效果会产生很大影响。

3.2.1 机动车饱和流率

机动车饱和流率指绿灯期间通过停车线的最大小时流

量，与进口道车道宽度、坡度以及转弯半径等因素有关。因此，在控制系统中利用感应检测器来实测饱和流率，并根据自行车的干扰程度，对标准饱和流率进行修正^[4]，能够满足混合交通条件下的信号配时需要。

3.2.2 自行车饱和流率

自行车饱和流率指在一次连续的绿灯信号时间内，进口道上一队连续的自行车流能够通过停车线的最大流量。自行车饱和流率的确定是自行车信号配时的基础。利用沈阳、天津和石家庄等典型混合交通城市的调查数据，标定了自行车饱和流率为1.07 bike/(m·s)。

3.3 机非折算系数

城市混合交通控制系统的车辆折算系数模型是通过折算系数将非标准车辆转换为标准车辆，为控制系统的输入提供统一标准。因此，折算系数的标定模型也必须依据混合交通控制系统的需求而设计。

3.3.1 机动车折算系数

根据车型确定折算系数的方法并不适用于交通控制系统。因此，需要重新分析不同类型车辆对交叉口通行能力的影响，进而确定其折算系数。选取饱和状态下的标准车车头时距为基准值，通过研究不同车身长度的非标准车对标准车车头时距的影响，采用实测数据标定基于车身长度的机动车的折算系数(见表1)。

3.3.2 自行车折算系数

自行车是造成交叉口运行效率降低的重要因素。将自行车的影响通过精确的折算系数转化为标准机动车的影响，进而实现控制参数的优化^[5,6]。自行车折算系数主要依据机非相互作用标定(见图1)。

1) 直行自行车折算系数

在某一时段没有其他干扰条件下，某一进口道直行自行车和直行机动车的饱和流率(折算为标准车)之和为定值。因此采用不同数量的自行车和机动车混合通过交叉口的数据，可以回归标定直行自行车的折算系数，通过实际数据回归标定结果为0.27。

2) 左转自行车折算系数

通过比较左转自行车影响前后直行机动车的延误时间来确定左转自行车折算系数，即首先确定单位左转自行车造成的直行机动车的延误，然后计算该延误时间内能够通过的直行机动车的数量来获得左转自行车的换算系数，通过实际数据标定结果为0.33。

综上所述，目前在路段及交叉口统一采用0.2的折算

表1 车身长度与折算系数对应表
Tab.1 Relationship between vehicle length and vehicle conversion factor

车长 /m	折算系数
≤ 3.0	0.33
3.0 ~ 5.0	1.00
5.0 ~ 6.0	1.49
6.0 ~ 7.0	1.77
7.0 ~ 8.0	2.00
8.0 ~ 10.0	2.28
> 10.0	2.88

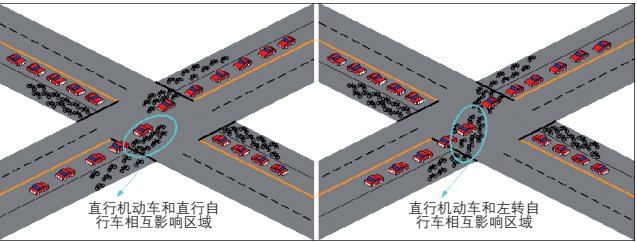


图1 自行车折算系数计算示意图
Fig.1 Bicycle conversion factor calibration

系数标准与实际情况有很大差别,应用于交通控制系统也必然产生很大误差。机非折算系数的标定能精确地量化交叉口实际交通需求。

3.4 混合交通流检测

传统的检测器并不能有效地区分非机动车与行人,因此,开发了基于视频的混合交通流检测装置,根据各种运动目标的不同特性,通过图像识别手段加以区分(见图2),并获得相关的流量、速度、密度及排队长度等参数,为控制系统中相关数据的获取提供了有效的方式^[7]。

4 混合交通流控制方法

在混合交通流特性研究的基础上,建立了混合交通流的控制方法。以城市快速路匝道控制来保证城市主动脉的畅通,以单点优化、干线协调和区域协调控制来优化交叉口信号配时,以公交优先控制实现公交车辆在交叉口的优先通过。

4.1 快速路匝道控制

城市快速路是城市道路的主动脉,是疏导跨区交通的主要通道,保障其安全畅通是整个城市交通控制的关键环节。

1) 入口匝道控制

快速路入口匝道控制是限制进入快速路的车辆,根据主线交通状态调整入口匝道进入的车辆数,以此保证快速路主线车流运行在最佳状态,达到确保城市大动脉安全畅通的目的。

2) 出口匝道衔接道路的控制

快速路出口匝道衔接道路的控制是通过适当截止与其相连区域道路的车辆,减少车辆交织,优先保证出口匝道车辆的驶出,提高这一区域车辆的运行效率,缓解由于出口排队造成主线拥堵的发生。

4.2 综合控制方法

4.2.1 单点优化控制

单点优化控制是城市交通控制的基本单元,是实现区域控制的基础。

1) 交通强度

结合流量和时间占有率提出了交通强度概念,建立了交通强度模型:

$$I_i = a \frac{q_i}{S_i} + (1 - a) \frac{O_i}{O_{Si}}, \quad (1)$$

式中: I_i 为相位 i 的交通强度; q_i 为相位 i 关键车道流量/(pcu·h⁻¹); S_i 为相位 i 关键车道饱和流量/(pcu·h⁻¹); O_i 为相位 i 关键车道时间占有率; O_{Si} 为相位 i 关键车道饱和时间占有率; a 为参数。

由于流量在交通畅通和拥挤时都较小,该指标不能够区分畅通和拥挤两种状态。交通强度指标综合了流量和时间占有率两个参数,在低峰时主要通过流量表征交通需求;而在高峰时主要通过时间占有率表征交通需求,有效避免了单一流量指标不能区分实际交通需求的弱点。根据不同的交通强度值,可以划分为不同的交通状态,相应地采用不同的控制方式。如图3所示,以四相位为例,交通强度为0.48以下时采用感应控制方式;而交通强度在0.48以上时采用协调控制方式,协调控制区域又根据不同的控制目标分为最小延误控制区和最大通行能力控制区,以交通强度为0.68作为分界线。在不同优化目标下,建立了交通强度与周期之间的对应关系,从而确定周期时长优化模型,以此满足不同交通状态下的实际需求^[8]。

2) 机非冲突信号配时

交叉口是机非冲突最明显的地方,有必要通过信号配时减少机非冲突,保证车流在交叉口安全有序的运行。

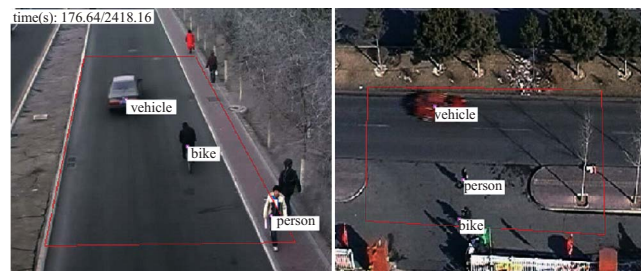


图2 混合交通视频检测结果

Fig.2 Results of mixed traffic flow video detection

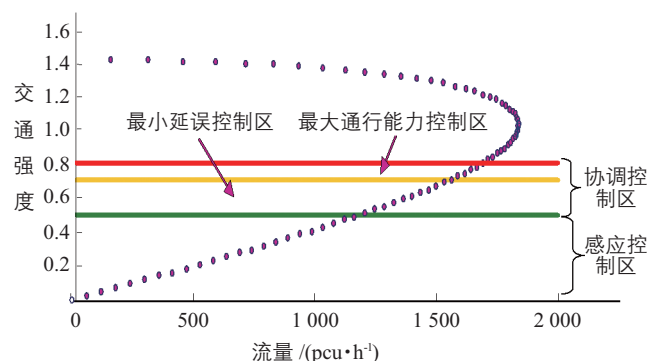


图3 不同交通强度下的控制方式划分

Fig.3 Control scenarios under different volumes

① 左转自行车专用相位 由于左转自行车与机动车之间存在严重干扰,为提高交叉口通行能力,减小机非冲突,在左转自行车超过临界值时,设置左转自行车专用相位,以分离机动车流与自行车流。该临界值是将饱和状态时通过的直行机动车通过折算系数转化为左转自行车来标定。

② 右转机动车专用相位 四相位交叉口自行车和机动车的冲突主要是右转机动车与直行自行车之间的冲突。通过计算右转机动车和直行自行车到达冲突区域的时间,来设置右转机动车提前截止与滞后放行的时间,避免了右转机动车与集群性通过交叉口的直行自行车流的冲突,减少了因为两者抢行而发生交叉口堵塞的几率,提高了交叉口的安全性和运行效率^[9]。

③ 自行车提前截止时间 自行车相对于机动车速度较慢,红灯起亮时已经驶过停车线的自行车在红灯期间可能不能全部驶过交叉口的冲突区,与下一相位的机动车流会发生冲突(见图4)。为了避免当前相位的自行车流与下一相位的机动车流的冲突,对当前相位的自行车流提前截止,提前截止时间为当前相位的自行车流与下一相位与之冲突的机动车流到达交叉口冲突区的时间差。自行车提前截止时间分为左转自行车提前截止时间和直行自行车提前截止时间。

3) 感应控制

感应控制配时方案是随检测到的流量变化而实时改变的控制方式,以绿灯延长时间作为重要参数。在充分考虑城市路段车流到达规律和驾驶人心理特性情况下,建立了可变单位绿灯延长时间模型,该模型能够自动生成最大绿灯时间,有效降低停车次数^[10]。

4.2.2 干线协调控制

干线协调控制是在满足非协调相位交通需求的前提下,以绿波带最大为目标,通过最大化干线车辆绿灯时间来达到干线车辆运行通畅的目标。同时,为了尽量保证非协调相位的交通需求,在干线协调优化的基础上,在交叉

口各方向实行自适应控制,以更加有效地利用绿灯时间。

1) 相位差生成

通过数解法生成的相位差是一种平衡相位差,即车队的上行和下行绿波带宽相同。但城市交通有着明显的潮汐性,即在不同时段干线上行和下行的交通量不同,因此这种平衡相位差未能达到干线车辆运行效果最优的目标。项目组建立了相位差优化目标函数,实现了流量不平衡时的双向绿波优化^[11],能够更好地适应城市交通流的变化特性。

2) 绿信比调整

由于实行干线绿波控制时,增大了协调相位的绿波带,可能造成协调相位的绿灯损失,非协调相位饱和度过高。因此利用感应控制原理,在保证干线协调优化的相位差不变的情况下,通过实时检测本相位车辆到达及下一相位车辆排队情况,来确定本相位的最大绿灯延长时间,进而达到干线绿波控制、支线车流绿灯时间有效利用的感应式协调控制的目的。

4.2.3 区域协调控制

区域协调控制是从总体对具有相关性的城市交叉口群进行协调控制,以达到区域内交通状态最佳的目标。同时,需要适当考虑特殊区域,避免瓶颈路段车辆排队溢出引发多米诺现象。

1) 区域相位差优化

为了降低区域交叉口信号协调控制方法的复杂性,提出了基于绿波的区域协调控制方法。该方法将复杂的区域路网分解为简单的干线与支线路,在利用干线协调控制算法优化相位差的基础上,将各条干线相结合并统一调整网络相位差,以达到优化区域相位差的目的。从而在保证干线协调控制效果的基础上,通过感应控制优化支线绿灯时间,实现了区域相位差优化的目的。

2) 环形交叉口的疏导方法

环形交叉口是城市中一类较特殊的交叉口,由于交通需求超出了其自组织的能力,往往会造成大面积的拥堵,成为城市交通的瓶颈之一。为了解决环形交叉口交通拥堵问题,提出了环形交叉口的上游信号协调控制疏导方法。该方法利用环形交叉口各进口道上游的信号协调控制,在时间上分离了进入交叉口的车辆,减少了环形交叉口内的车辆交织,在保持环形交叉口原貌的前提下,有效解决了交通拥挤问题,与环岛加信号方法相比,利用了环岛自组织的功能并大大降低了投资。

3) 瓶颈控制

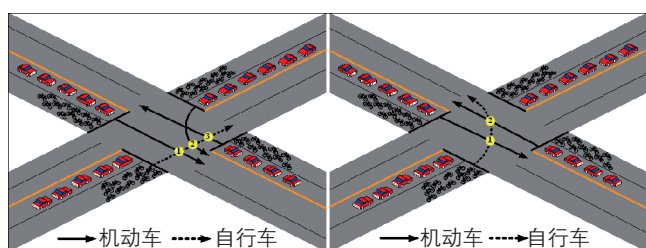


图4 自行车流与机动车流冲突示意图

Fig.4 Conflicts between vehicles and bicycles

瓶颈控制主要是针对路网中的较短路段而设计,通过分析瓶颈交叉口排队的形成规律,提出了以交叉口各进口道排队长度为约束目标的瓶颈控制策略,建立了瓶颈控制配时模型,有效地避免了瓶颈路段排队车辆上溯至上游交叉口所导致多米诺现象的发生。

4.3 公交优先控制

优先发展公共交通是解决城市交通问题的最重要手段之一。因此,利用信号控制实现公共交通在交叉口的优先通过是实践公交优先战略的重要环节。通过公交检测器实时检测公交车辆的到达信息,根据不同的到达时刻,分别采用绿灯延长、绿灯提前启亮或插入相位的方法实现公交优先通过。这一方式又可以根据公交车的优先级别、发车频率、有无专用车道等因素分为BRT优先控制和普通公交优先控制。

5 应用实例

基于上述算法开发的具有完全自主知识产权的城市交通控制系统已经应用于许多大中城市。北京、青岛、福州三地的控制系统运行前后的交通调查数据见图5~7(图7中无缆线控指在不能进行系统优化时,按人工设置的相位差

运行),由图可知,在控制系统运行后,车辆延误和行程时间都显著降低,平均延误减少10%~20%,平均行程时间降低5%~10%。上述数据表明该系统具有良好的控制效果,为城市交通管理提供了有力的保障。

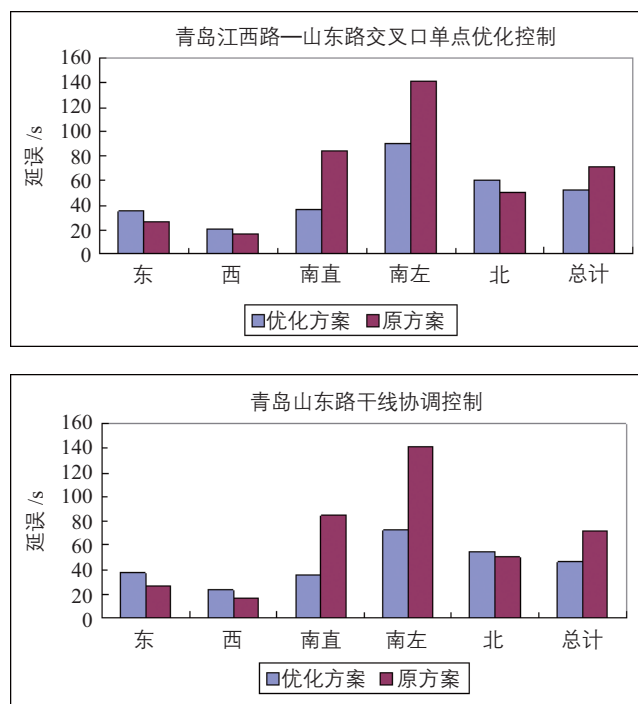


图6 青岛单点优化与干线协调控制效果对比

Fig.6 Single point control and coordinated arterial control in Qingdao

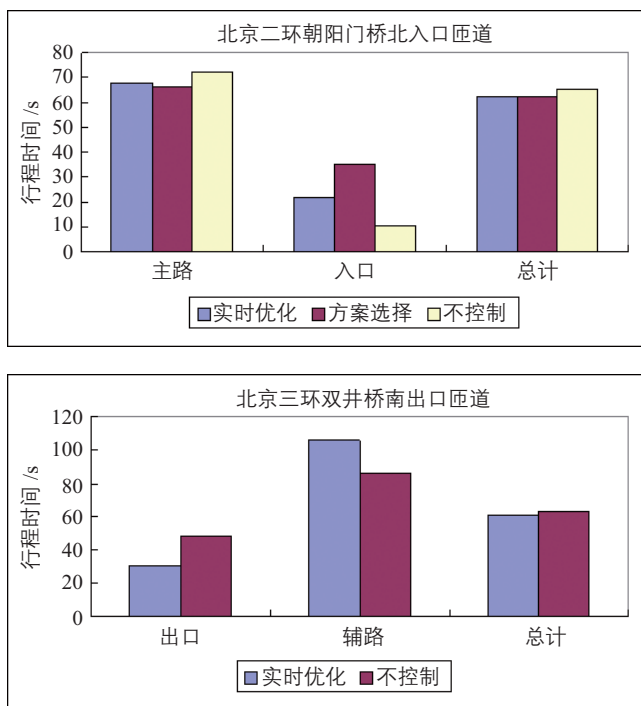


图5 北京快速路匝道控制效果对比

Fig.5 Expressway ramp control in Beijing

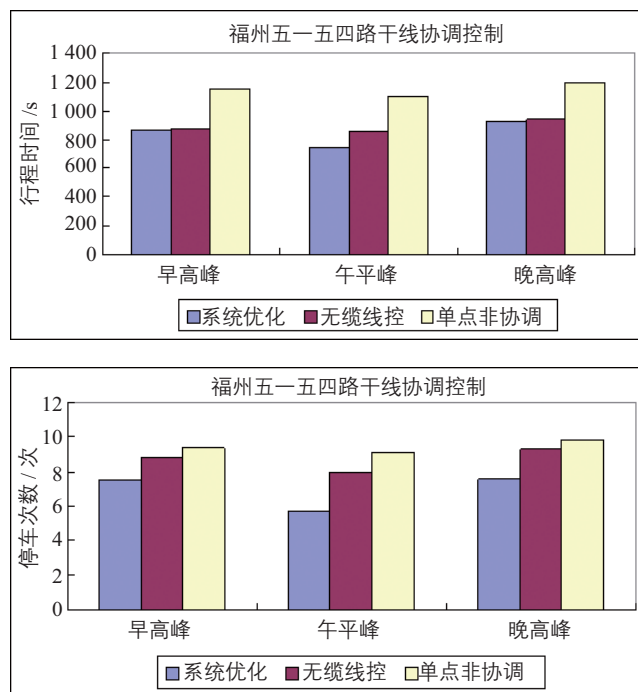


图7 福州干线协调控制效果对比

Fig.7 Coordinated arterial control in Fuzhou

6 结语

基于我国城市交通特征分析和混合交通流特性研究，取得以下研究成果：①确立了混合交通控制系统设计理念；②依据混合交通流理论，标定了混合交通控制系统的关键参数；③建立了较为完善的城市混合交通控制的方法体系。这些成果已经集成开发为混合交通控制系统(HiCON)，并已在北京、青岛、福州、苏州、太原、长春等许多城市进行了应用，取得了良好的控制效果。但面对复杂的交通现象，尤其是针对突发事件以及特殊天气条件下的交通控制，还需要进行进一步的研究，这也是未来交通控制系统需要完善之处。

参考文献

1 仇保兴.中国城市交通发展展望[J].城市交通，2007，5(5): 6-12

2 曲昭伟，周立军，王殿海.城市信号交叉口行人及自行车到达与释放规律[J].公路交通科技，2004，21(8): 91-94

3 景春光，王殿海.典型交叉口机非冲突分析与处理方法[J].土木工程学报，2004，37(6): 97-100

4 景春光，曲大义，梁春岩.两相位交叉口机非冲突对机动车饱和和流率的影响研究[J].公路交通科技，2007，24(8): 124-127

5 Wang Dianhai, Jiang Jingling, Yang Shaohui, Qu Zhaowei.

Measurement of Vehicle Conversion Factor [A]. ASCE. ICTTS2004[C]. China: Science Press, 2004. 765-771

6 Wang Dianhai, Liang Chunyan, Jing Chunguang and Wang Guohua. Bicycle Conversion Factor Calibration at Two-phase Intersection of Mixed Traffic[J]. Journal of Tsinghua Science & Technology, 2007, 12(3): 318-323

7 李志慧，张长海，曲昭伟，王殿海.交通流视频检测中背景模型与阴影检测算法[J].吉林大学学报(工学版)，2006，36(6): 993-997

8 Li Hongqiang, Wang Dianhai, Qu Zhaowei. Research on the Optimization Model of Cycle Length for Signalized Intersection[A]. ASCE. AATT2004[C]. United States: Reston, 2004. 371-376

9 梁春岩，王春光，沈战，王殿海.机非混行交叉口右转机动车行程时间计算方法[J].吉林大学学报（工学版），2007，37(5): 1053-1057

10 Wang Dianhai, Song Xianmin, Li Hongqiang. Research on Actuated Control of Changeable Unit Extension [A]. ASCE. AATT2004[C]. United States: Reston, 2004. 361-365

11 Wang Dianhai, Song Xianmin, Li Feng. Research on Offset Optimization of Signalized Arterials [A]. ASCE. ICTTS2006 [C]. United States: Reston, 2006. 584-594

(上接第32页)

但本方案在为全局应用提供更有效的数据融合和数据挖掘功能方面有所不足，主要体现在数据融合和数据挖掘功能较单一，使用较烦琐，需要进一步的研究。

参考文献

1 Johnson C.M., Thomas E.L.. Metropolitan ITS integration: a cross-cutting study working together to improve transportation [EB/OL]. [2003-01-05]. http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/13672.Html

2 Smith B.L., William T.S.. Development of integrated intelligent

transportation systems [A]. In: Transportation Research Record 1675[C]. Washington, D.C.:TRB, 1999. 85-90

3 李瑞敏，陆化普，史其信.智能交通系统综合信息平台研究[J].中南公路工程，2005，30(2): 30-33

4 关积珍. ITS 共用信息平台系统结构及集成[J]. 交通运输系统工程与信息，2002，2(4): 11-16

5 安实，王健，徐亚国，李静.城市智能交通管理技术与应用[M].北京：科学出版社，2005

6 杨兆升.基础交通信息融合技术及其应用[M].北京：中国铁道出版社，2005