

摘 要

随着我国经济建设的快速发展,城市交通量大量增长,交通问题日益严重,成为制约城市经济发展的瓶颈。城市公共交通系统以其人均动态占用路面面积少、人均造成的污染低等特点成为解决我国城市交通问题的主要途径。但是由于我国经济水平不够,发展城市轨道交通的能力有限,在总结快速公交(BRT)系统的各项优点并将其技术经济指标与轨道交通相比较后发现大力发展快速公交系统是目前解决城市交通问题的一个有效的方法。而路权上的优先以及交叉口的优化控制与设计是BRT系统实现公交“快速”“高服务水平”的重要手段。

由于BRT专用道是实施交叉口优化控制与设计的先决条件之一,本文首先对目前国内外主要采用几种BRT专用道形式进行对比,为了提高BRT系统的能力并且根据我国的实际情况,重点对路中型的BRT专用道进行探讨,从道路条件以及交通条件两个方面对路中型BRT专用道设置的原则进行了分析。并从路段上所有出行者出行时间最短的角度出发,计算了实施BRT专用道后节约的路段总出行时间以及此时BRT专用道上的最佳车流量比。

紧接着对实施路中型专用道的BRT系统在交叉口实施信号优先的必要性进行分析,并对BRT在平面交叉口的主要采用的控制模式进行对比,进一步根据实际情况提出了对BRT系统在线路上的线控制的实施办法。

然后基于交叉口乘客总的延误时间最小,对交叉口的信号配时分别从信号周期不固定寻找最佳信号周期以及信号周期固定两个方面进行优化设计。

最后通过对成都市二环路解放路路口实施BRT信号优先控制的案例进行分析。

在下一步的研究当中可就对BRT系统实施线控制应考虑的影响因素、BRT系统停靠站对交叉口的影响、交叉口行人和非机动车的修正系数等方面进行详细的探讨。

本文主要立足于静态交通对快速公交系统在交叉口的优化控制与设计的方法进行研究,具有一定的可操作性,期望能对相关的研究工作有所帮助。

关键词 快速公交系统; BRT专用道; BRT交叉口信号优先; 延误

Abstract

With the development of urban economy, because the traffic of urban increases in the gross and the traffic problems of urban become increasingly severe, the traffic have become the bottle neck restricting urban economy. Because of less of the average dynamic occupying road area and little pollution, urban public transport is the main approach accounting for the transport problems. Limited by the disadvantages of high invest, long build period and less flexible, railway transit isn't advocated. Owing to a economic and efficient public transit, Bus Rapid Transit (BRT) is a better way to solve the urban traffic problems.

Compared the method of BRT lane, the paper mainly study the bus lane intercalated in the center of road. It analyses the setting principle in the aspects of the condition of road and traffic, works out the total travel time and optimal vehicle scale being saved after the bus lane sitting in the center of road for all traffic participators total travel time is shortest.

The paper analyses the necessity of BRT signal priority in the intersection, and enumerates the main control mode. It discusses control tactic on the side of signal priority in the plane intersection. the paper considers how to make the BRT vehicle carry out line control in the intersections.

From the point of view of the shortest travel time, the paper discusses two aspects if the intersection signal cycle is aptotic.

The case analyzed, method is maneuverability to control and design optimally in a intersection on bus rapid transit.

Factors of liner control, impact of BRT stops and corrected modulus on passby and non- mobile can be studied in the ulterior research.

The research will provide the references to control and design optimally in a intersection on bus rapid transit for in our country's cities.

Keyword: Bus rapid transit; BRT lane; BRT intersection signal priority; Delay

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

21 世纪,随着国民经济的飞速发展,城市化进程加快,大城市交通问题也越来越严峻。交通拥挤、秩序混乱、事故频发、污染加剧等城市交通问题已逐步成为制约社会经济发展的瓶颈。而造成这些交通问题的原因主要是由于城市道路交通基础设施建设的速度跟不上交通需求增长的速度,现有道路利用率不高,出行交通结构不合理,道路通行优先权不明确等,从而诱发了大量的路面交通量。

目前我国城市道路资源大大落后于交通需求,人均道路面积仅是国外发达国家城市的 1/8。城市要在有限的道路空间内解决好车辆增加与道路畅通的问题,实现人和物的移动,就应该根据各种交通方式运送人和物的效率来分配道路空间的优先使用权,实现人和物快速、高效、经济的运动。优先发展公共交通能有力的促进城市道路交通发展。相对小汽车而言,公共电汽车具有运量大、占道少、效率高、节省能源、对环境污染小等特点。一辆大公共汽车占道面积约等于两辆小汽车,而载客数量却是两辆小汽车的 40 倍左右;公共电汽车完成单位客运量消耗的能源是小汽车的 1/10 左右;从环保方面的空气污染和热源污染方面看,大型公交车辆又比小汽车按人均低 90%左右^[7]。

表 1-1 各种交通方式动态占用道路面积情况比较^[15]

交通方式	人均占道面积 (m ² /人)	以轿车为 1 的比例
步行	0.75	0.025
公交车	4.50	0.15
摩托车	18.00	0.60
有轨电车	1.50	0.05
地铁	0	0
自行车	8.00	0.27
小汽车	30.00	1.00

因而提出切实可行的城市公共交通优先发展措施,大力发展公共交通,减少其它道路利用率低的交通形式,可以使我国大城市的交通压力大大减轻,缓

解交通紧张的局面，同时也有利于减少环境污染。

目前我国国内常用的公共交通方式主要是常规地面公共交通系统、快速轨道公共交通系统、辅助公共交通系统等。

快速轨道公共交通系统包括地铁、轻轨、高速铁路，它具有运量大、速度快、可靠性高等特点，并可以促进城市土地开发。但是由于轨道交通造价很高、建设周期长、不易成网以及建成后基本上不能盈利等难以克服的缺点而不被提倡。常规公共交通系统包括公共汽车、有轨电车、无轨电车，其中以公共汽车为主，它具有灵活机动、价格便宜的特点，但是其缺点也极其突出，载客量小、速度慢、服务水平低、运输时间延长等使得常规的公共交通方式吸引力差。表 1-2 为我国城市公共交通汽（电）车的服务水平状况。

表 1-2 我国城市公共交通汽（电）车的一般服务水平统计表^[7]

指标名称	20 个城市的情况统计结果
运送速度 (km/h)	11~24
行车准点率 (%)	79~92
平均站距 (m)	500~900
换乘率 (%)	22~80
换乘距离 (m)	70~500 (一般 200~300)
高峰满载率 (%)	80~115
全日满载率 (%)	36~81
乘客候车时间 (min)	3~20 (一般 5~10)
居民公交乘用率 (次/人·年)	120~760 (一般 200~400)

通过 2002 年对成都市公交进行问卷调查发现公交出行者普遍认为最重要的服务项目为运行频率的占 42%、运行速度占 39%、运行准时占 37%。而成都市公交车的旅行速度在混杂区间则只有 10km/h~13km/h，等同于自行车的速度，这使得公交方式的吸引力较差，大量的成都市民选择采用自行车出行，进一步增加了城市交通的负担。2002 年成都市公交出行的分担率仅为 14.8%。目前我国大城市居民出行采用的交通方式比例平均值为：自行车 55%，公交车 8%，其它机动车 12%，步行 25%。因而，要大力发展我国的城市公共交通就必须通过“快速”与“准时”来刺激公交出行的增长。

在过去的 10 年中，中国的公交优先战略首先体现在大力发展轨道交通上，经历了从地铁到轻轨的逐步转变。最近，中国交通界和各大城市又在热衷于研究和建造快速公交系统 (Bus Rapid Transit, BRT)，而地铁和轻轨则作为参照物

同快速公共交通进行对比,其中建设造价的高低往往是最主要的考虑因素之一。

由于资金和建设周期的限制,轨道交通不可能在短期内完全解决交通问题,而国内城市私人汽车保有量和使用率正在快速增加,快速公交系统作为城市交通系统的重要组成部分,可以同轨道交通配合,提供舒适方便的公交服务,以引导市民出行采用公共交通系统,减少小汽车交通的使用率,从而达到缓解交通拥堵的目的。在功能上,快速公交系统可以与地铁配合使用,搭建公共交通网络;也可以作为地铁的过渡方式,当一条轨道线路在短期不能实施的,完全可以通过先期快速公共汽车交通系统的实施解决交通问题,并培养客流,当客流达到一定水平以后及财政实力容许的前提下再改为地铁;快速公交系统也可以作为地铁的延伸,在客流相对较少的地铁延伸线上采用。而在国内的一些大型和中型城市,快速公交系统完全可以作为城市公共交通系统的主体,实现快速优质的公交服务。

当一个城市在建立快速公交系统同时,必须同时重视与轨道交通系统及普通公交的整合与优化工作,逐步推广城市公共交通系统多元化的发展方向。多元化的发展和改善城市公共交通系统,是缓解中国城市交通拥堵的重要举措之一,也是城市交通可持续发展必不可少的战略决策。

由于交叉口是影响公共交通速度以及服务水平的一个重要因素,本文将主要研究路中型快速公交系统在交叉口的优化控制与设计,以期能对中国的 BRT 系统的建设与完善提供一些较好的建议。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外的研究现状

自上个世纪 60 年代,巴西的库里蒂巴(Curitiba)为了解决城市交通问题,同时也为了降低成本首次采用快速公交系统(BRT)以来,由于其具有运营方式简单、建设周期短、可分期分步建设且成本低等特点,为解决的城市交通问题提供了一种新的方式,而被世界各国城市交通问题处理专家所青睐。

目前国外的许多学者已经对 BRT 系统的实施运营作出了大量切实可行的研究。美国联邦交通部公共交通署(FTA)一直在致力于快速公交系统的开发,并制定了快速公交系统项目的评价标准如表 1-3 所示。

表 1-3 快速公交系统的评价指标体系^[41]

评价标准	指标
出行时间	平均每次出行总时间（分钟）
准点	平均每次出行时间耽误（分钟）
乘客数（定量）	平均每辆公车每次出行的乘客数
乘客数（定性）	出行者交通工具的换转，乘客的社会经济特征
沿线交通情况	汽车数量和行驶速度
横向交通情况	横向车辆在交叉口的停车时间
空气污染	污染排放量
土地使用及城市设计	车站周围的用地特征
公交系统形象	公众对 BRT 的认知
成本	系统成本，各组成部分的成本
投资效益	每分钟节省时间的效益，每个新增乘客的效益

德国的 GTZ 在“Planning Guide: Bus Rapid Transit”中对德国的 BRT 系统的定义、选择因素、项目规划等各个方面进行了详细的探讨。

此外，其他的一些国家和城市，例如巴西的库里蒂巴、澳大利亚的悉尼、法国的罗恩等等都对 BRT 的实施进行了一系列的研究，以便能解决城市交通问题。这些城市也分别对快速公交系统的交叉口优化控制与设计做出了一定的研究。

1.2.2 国内的研究现状

目前国内的对公交专用道以及交叉口公交优先信号的研究较多，但是这主要是针对常规的公交车辆，而针对 BRT 进行系统研究的文献较少，大多数都是对国外已有的 BRT 系统运营实施的情况的介绍。

在胡润州的《快速轨道交通系统与快速公交系统的经济分析》一文中从经济学的角度指出目前我国大城市在经济实力不够强大的情况下，采用 BRT 是一种良好的解决交通问题的方式。

在陈雪明的《对巴士快速交通的定位分析》中，对 BRT 系统与轨道交通方式之间的优缺点进行了一定的对比，并指出了各种公共交通方式适用的范围。

陈凌青在其硕士论文《大城市高档快速公交服务模式研究》对 BRT 系统在中国实施的可行性、服务标准定位以及发展快速公交的基本客流要求等方面进行了一定的阐述。

陈钦水在其硕士论文中对城市地面快速公交网络系统规划研究提出了“分级规划，分区布线”的快速公交线网规划方法，并对快速公交线网换乘设施规划进行研究，建立了一套公交线网规划的评价指标体系。

胡刚在其博士论文中对于 BRT 在城市中的站点优化以及公交换乘枢纽进行了一定的研究。

但对于大城市快速公交系统如何体现其快速性的两个重要因素的优化设计，包括专用路权的分配、平面交叉口的信号组织尚未得到较好的研究。对于 BRT 系统在大城市如何实现交叉口信号的优化控制与设计尚未有一个完善的理论基础。

1.3 论文研究目标与主要内容

在中国大城市应用 BRT 系统的优化设计研究主要需要解决的是在道路资源有限的情况下合理的分配城市道路资源，使得 BRT 系统能够真正达到“快速”的目的，以提高公共交通的吸引力。

1、对 BRT 系统的发展进行研究

结合我国大城市的特点，从公交优先出发对国内外已采用的 BRT 系统进行分析，包括：BRT 系统的主要特征、适用范围、可采用的形式以及优点等。

2、对 BRT 系统专用路权的分配进行分析对比

根据 BRT 系统在城市中所处的地位，对其专用路权的分配方式进行分析，重点研究了路段上设置路中型专用道前后 BRT 车辆与其他车辆平均行驶时间的变化，从而对 BRT 车辆以及其他车辆上的乘客的平均行驶时间进行分析，以期能节约乘客总体出行时间。进一步确定了 BRT 专用道上的最佳车流量比。

3、BRT 系统的交叉口运行模式分析

对 BRT 系统，特别是专用道设在路中的 BRT 在经过交叉口时的冲突情况进行分析，提出可利用立交和平面交叉口信号配时两种方式来满足 BRT 车辆“快速”的要求，并对各种信号交叉口 BRT 优先方式进行比较。

4、BRT 系统交叉口信号优化设计

基于交叉口乘客总的延误时间最小对交叉口的信号配时分别从信号周期不固定和信号周期固定两个方面进行优化设计。

5、实例分析

利用本文所研究交叉口信号优化设计的方法，对成都市二环路解放路交叉口实施 BRT 交叉口信号优化控制与设计。

1.4 研究技术路线

本文将收集国内外城市中已实施快速公交系统的基础资料及运营情况等，总结已有的道路快速公交系统运行的特点及经验，在此基础上提出适合我国城市特点的快速公交系统交叉口信号优先控制与设计的运营措施，专用路权的分配后交叉口快速公交车辆的信号该如何配置等，最后通过实例分析来说明本文中所研究方法的可操作性。

第 2 章 BRT 发展分析

2.1 城市公共交通

2.1.1 城市公共交通系统的组成

城市公共交通（Urban Public Transit）是城市中通过交通工具为公众提供经济方便的出行服务的交通运输系统，狭义的公共交通是指在规定的线路上，按固定的时刻表，以公开的费率为工作提供短途出行服务的系统（Wolfgang, 1982）。城市公共交通根据其速度和服务水平的不同主要分为常规地面公交系统、快速轨道系统、其他（出租车和轮渡等辅助和特殊的交通运输系统）。

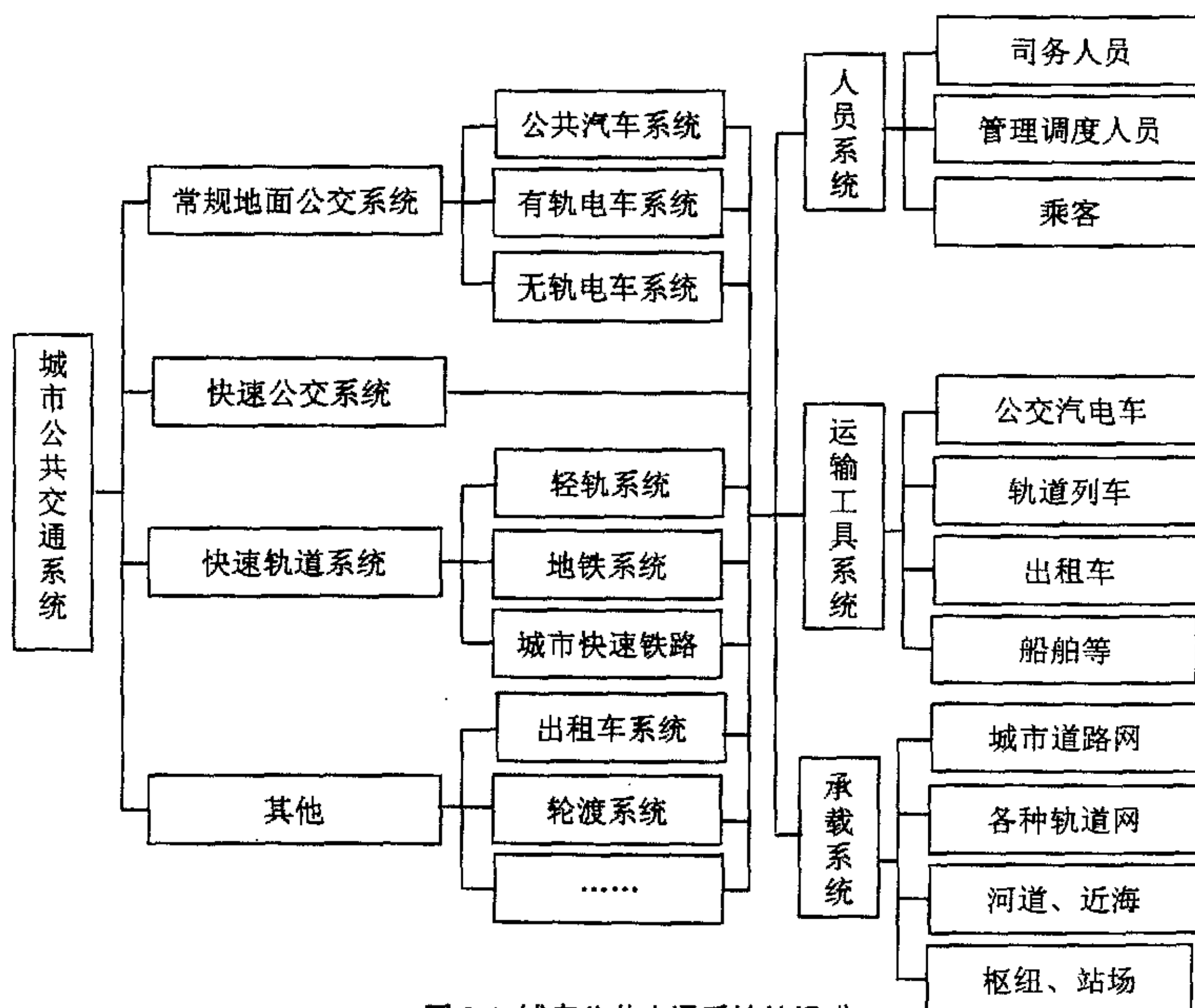


图 2-1 城市公共交通系统的组成

1、常规地面公共交通

主要具有灵活机动、价格便宜的特点，是使用最为广泛的公共交通系统。目前，我国城市公交系统中地面公共交通承担了城市 80% 的客运量。

但是其缺点也极其突出，载客量小、速度慢和服务水平低、运输时间延长、等使得常规的公共交通方式吸引力差。

2、快速轨道交通

载客量大、速度快和服务水平高因而吸引力强，但是其造价及对路基的特殊要求使得政府部门很难承受。

(1) 地铁：一般都是建在地下，从而避免城市地面的拥挤并充分利用空间。其显著的特点是运量大（为地面上的一般公共汽车的 7~10 倍）、速度快（比一般电车快 2~3 倍）、无污染（地铁列车是以电力作为能量，不存在空气污染的问题）等。但是其缺点也很突出，造价太高，建设周期长同时运营后基本是无盈利（除香港外），将会给建设投资商带来巨大的财政负担，这从很大程度上限制了地铁的发展速度。考虑建设的条件：从技术经济角度上看，只有特大城市的市中心地区或者交通流量极高的走廊才有可能发展地铁交通；地铁线路既要连接最重要的城市活动中心，又要使得线路结构简单直接；沿线地质条件必须符合开挖隧道的要求，尽量避免多断层的地段等等。

(2) 轻轨：具有较强的线路特征，低噪音，无污染、行驶平稳并具有较低的运营成本，同时轻轨交通比较容易改造成地铁等快速交通系统。但其造价相对较高，建成后线路特征很难改变且建设时间较长，同时在客流量固定的情况下，轻轨交通会减少服务的频率。考虑建设的条件：尽可能利用废弃的铁轨以降低成本；靠近现有的变电站以降低输电成本；同居住区保持适当的距离等等。

2.1.2 公交优先

“公交优先”于 20 世纪 60 年代初源于法国巴黎，很快被饱尝交通拥塞之苦的欧美等发达国家大城市所接受并逐步完善，现已被证明是一项很有成效的城市交通基本政策。

目前公交优先已成为许多大城市面临一系列的交通问题的重要解决办法之一。狭义的公交优先指的是城市内部的客运交通以大容量、快速的公共交通系统为主，其他个体交通工具为辅。广义的公交优先是指公交在“路权”使用上

的优先，更是指公交在规划、财税和经济政策上的优先。图 2-2 为公交优先的发展战略。

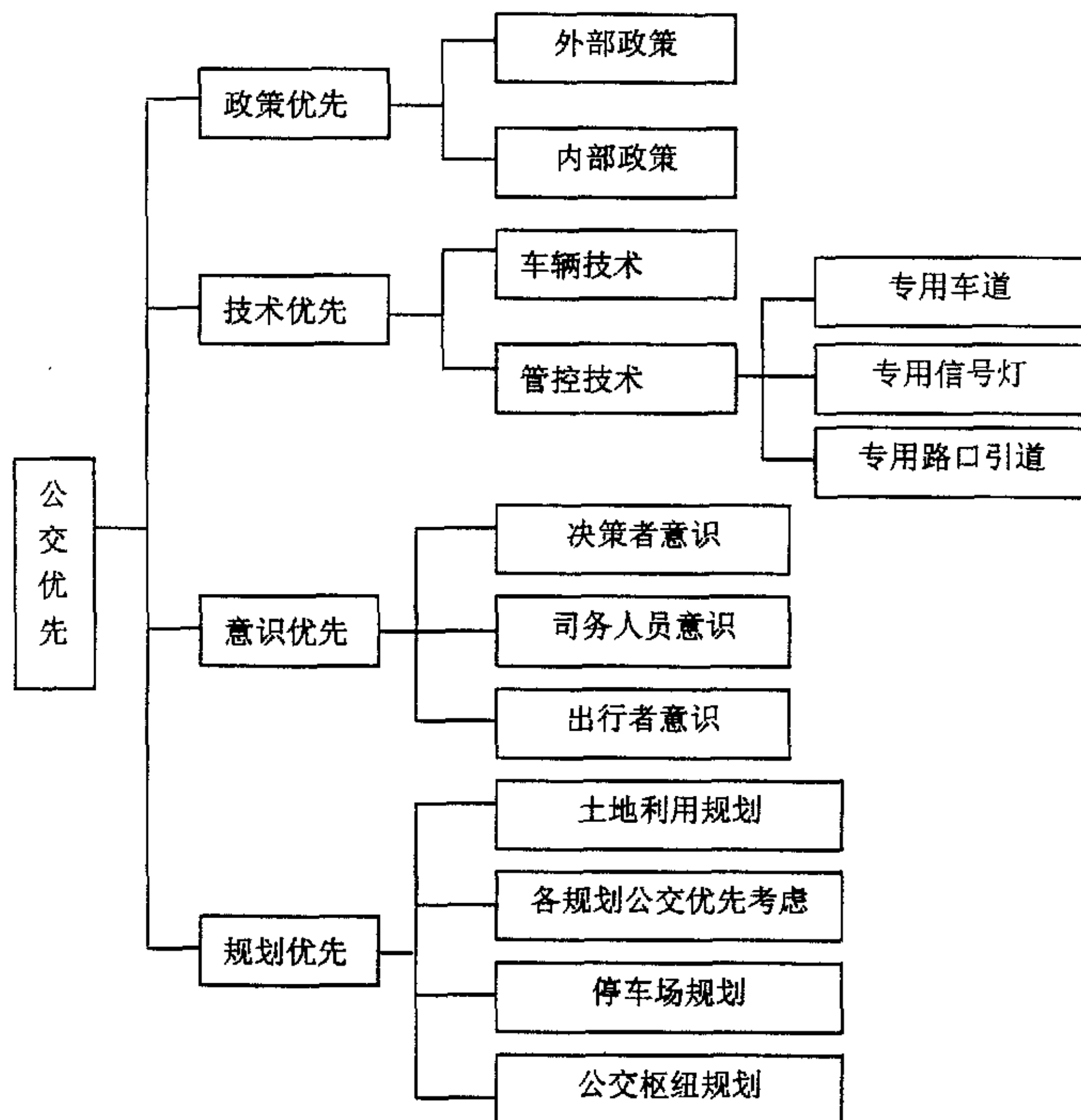


图 2-2 公交优先发展战略框架

公交优先首先体现在公交在道路通行上的优先。一是在城市交通主干道上开辟公交专用道，解决规划与管理相脱节的问题；二是在信号灯灯控管制系统中设立公交优先通行信号；三是在交通要塞解除控制公共交通流量的限制；四是对公交不准设置禁行道路；五是改造道路交叉口，增设专门用于公共汽车通过的辅助线，使得公共汽车能够从旁边超越前面的小汽车而直接通过道路交叉口。其次，政府可以在城市交通政策特别是财政和税收方面给予公交发展以优先地位。

目前在实施公交优先发展战略的过程中，一般有常规公共交通和轨道交通

两类公交工具可选择。

但是对于经济尚不发达的发展中国家，在实施公交优先的战略中，常规公共交通无法满足要求，而轨道交通投资太大，回收太慢将为政府带来沉重的经济负担，为此快速公交系统为其提供了一个良好的交通方式。

2.2 快速公交系统

快速公交于上个世纪六十年代出现在巴西的库里蒂巴，是一种介于普通公交运输与轻轨交通之间的交通方式。就本质而言，快速公交系统仍属于巴士交通的范畴，是一种高等级、高服务水平的巴士交通，它应用现代巴士技术配合智能交通和运营管理，以较低的工程造价使改造后的巴士交通系统达到或接近轻轨交通系统的服务水平。快速公交系统具有常规公交灵活、造价低廉的特点也具有轻轨交通容量大、快速等特点，因而又被称为“路面地铁”。

2.2.1 BRT 的主要组成部分

美国 FTA (Federal Transit Administration) 对世界各国 26 个实施 BRT 系统的典型城市的交通系统进行了统计分析，认为 BRT 主要特点包括了 BRT 专用车道、车站设施、车外购票、改良型的公交车辆、ITS 公交系统及全天候服务 6 个方面，这些城市在 BRT 应用方面的情况如表 2-1 所示。

表 2-1 BRT 系统不同特征的设施使用情况表

特点	应用的城市数 (个)	应用率 (%)
BRT 专用道路	24	92
车站	19	73
改良的公交车	11	42
车外购票	5	19
ITS 智能公交系统	11	42
全天候服务	22	85

国内的 BRT 研究主要是引进了国外的一些先进的理念，有学者认为 BRT 系统包括了 7 项核心内容，即“专有路权、现代化的公交车辆、水平上下车、车外售票、交叉路口处的优先、乘客信息和车队管理系统”。但其实质内容基本上相同。因而可以认为 BRT 系统主要有以下几个部分组成。

一、专用道路

BRT 的专用道路使得 BRT 系统与其他交通方式得到了分离,体现了道路使用权的优先分配,从而确保了 BRT 实现快速、省时的目的。在传统的混用路权中,小汽车由于体形小具有较好的灵活性而具有优先权,所以只会引导出更多的小汽车交通,而无助于从根本上解决公共交通问题。为了解决给公共交通与私人交通的相互影响,BRT 系统采用专有路权,在主要交通走廊上使用公交专用线或专用车道,使得 BRT 系统与其它车辆从空间上分离。

当在城市主要交通走廊上设置了公交专用道之后,私人交通的行驶空间减小,行车环境会受到较大的影响,因此在必要的条件下,可以在主干道两侧的支路上配合设置私人车辆专用的单行线,以保证私人交通工具的行驶空间。

对 BRT 专用道路的实施将在第三章中详细分析。

二、新型大容量公交车辆

从提高运量的角度,对公交车辆最重要的要求就是提高载客能力和发动机的功率。为了将公共汽车发展成大运量的交通工具,BRT 系统采用新型大容量公交车辆,解决了当前很多城市公共电汽车的低容量、舒适性差、污染严重等负面问题。以库里蒂巴已投入使用的双关节通道式客车为例,它总长度为 30 米,

载客量可达到 300 人,是普通公共汽车的三倍。车厢前后有四个车门,车内宽敞明亮,整个车体采用了先进的悬挂系统,乘坐起来舒适安全,操作也更为简单。尽管双关节公共汽车车身很长,但其转弯

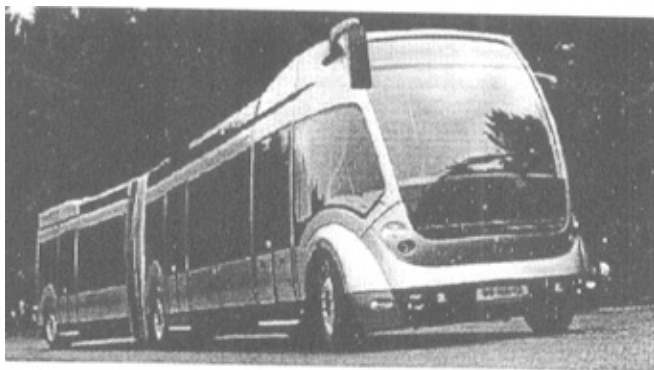


图 2-3 新型大容量的 BRT 车辆

半径(11.2 米在前轮处)却很小,因此灵活性较强。尾气排放也通过净化系统得到有效的控制。这种大容量现代化公交工具的采用将提高公交对乘客的吸引力,而载客能力可以达到轻轨的水平。

此外,低底盘的 BRT 车辆能够使乘客特别是残疾人快速平稳地上下车,节

约了时间，提高运营速度。

三、新颖的 BRT 车站

根据 BRT 车站所处的地段环境将其设计成为各种不同的建筑形式，以期能与城市整体景观融为一体（如图 2-4 所示）。同时为了提高 BRT 的整体的运营速度以及服务水平，进一步的突出了其人性化的设计：



图 2-4 新颖的 BRT 站台



图 2-5 方便残疾人上下车

1、车外购票系统

传统的公交系统多采用车内收费方式。而 BRT 系统将售票系统置于公交候车站站内，在公交车辆进站前完成收费，从而实现快速简单的售票，提高上下车的速度，节省公交等候时间。就具体的操作方法而言，车外售票可以采用传统售票方式，但最好能采用电子收费系统，利用智能卡技术使收费过程自动化，从而产生更多的额外效益。

2、为乘客提供交通信息

通过在 BRT 车站站内建立乘客信息服务系统，为乘客提供动态信息（即位用户提供实时的情报，例如路线上车辆的运行情况等）以及静态信息（包括公交线路、时间表和运价表等等）。

3、水平上下车

在上下车方面，显得更加具有人性化，考虑到老人和伤残人士的上下车问题，同时也是为了提高上下车的速度，在设立两个大车门的基础上，采用提高站台高度的方式或是使用低底盘的车辆，方便水平上下车。具体如图 2-5 所示。

四、交叉路口优先

当公交系统不享有优先权时，在交叉路口尤其是拥堵交叉路口处，公共交通将受到相同方向及不同方向其它车辆的干扰，公交车辆在交叉路口内以及交叉路口附近将频繁的减速、停车，从而造成公交车辆的延误，公交乘客出行时

间也变长。另外,拥堵交叉路口产生的干扰导致公交车辆受控情况较差,车辆行驶很难与计划保持一致,即公交服务的规律性和准时性得不到保证。同时难以在车辆间保持规则间距,从而造成公交车辆的分散或聚集。

为了避免公交车辆在交叉路口处的干扰和延误,BRT 系统的研究人员提出,应通过智能型的信号系统或具有高差的基础设施(隧道或高架)在交叉口处为公交车辆提供优先权。交叉口处公交优先权的赋予将使公共交通具有准时、与计划一致、出行时间减少等一系列特征,同时公交系统具有的优先性将给公交乘客带来良好的心理影响,从而使公交系统更有吸引力。对于交叉路口优先将在本文第 4、5、6 章中进行详细的研究。

五、ITS 的应用

为了能够对 BRT 系统的运营进行有效的控制,目前对 BRT 大量采用了 ITS,主要有通过无线数据通信网、GPS 等实现了公交车乘客信息系统、即时播报系统等,对 BRT 车辆在平面交叉口进行了交通感应信号系统,在车站实现了电子收费系统,这样进一步提高了整个 BRT 公交系统的运行效率。

2.2.2 BRT 系统的国内外发展实施情况

BRT 于二十世纪六十年代最早出现在南美国家巴西的库里蒂巴(Curitiba),由于大容量快速公共汽车运营系统(简称快速公交系统,英文简称 BRT)具有运营方式简单、建设周期短、可分期分步建设且成本低等特点,目前世界各地许多城市都开始对其进行研究并已经得到了运用。

在美国联邦交通部公共交通署(FTA)一直在推动快速公交系统的开发。美国的 BRT 系统的早期形式表现为公交专用道的发展,20 世纪 70 年代是专用道迅速发展的时期,公交专用道还对多成员车辆以及公用小汽车开放。到 80 年代增长率超过了 100%。1981 年纽约第一条公交专用道开通,效果非常明显,公共汽车行驶时间减少了 34-42%,乘客增长了 10%。在意识到建设 BRT 系统的成本只有轻轨的 4%后,俄勒冈州 1999 年开始发展 BRT 系统,2000 年洛杉矶试行 BRT 系统,乘客量增加了 42%,节省出行时间 29%。在美国的 BRT 建设中存在的主要问题是道路空间不足,尤其表现在交叉口。

巴西的库里蒂巴 BRT 系统是比较成功的典范,其 BRT 系统的服务水平已经达到了轨道交通系统的水平。20 世纪 70 年代,基于经济上的考虑,库里蒂巴

将原有的为轻轨交通预留的道路空间用于建设公交专用道。目前 75% 的库里蒂巴市民出行乘坐公交车。库里蒂巴的 BRT 系统仅投资了地铁成本的 6%-8% 投入, 承担了 60%-70% 的地铁运输能力, 覆盖了城市面积的 85%。

加拿大渥太华的公交专用道是北美最完整和使用率最高的公交专用道。渥太华自 1982 年开始建设公交专用道, 每天乘客人次在 20 万以上。他们采用的是城市外围地区先行建设, 城市中间的密集地区有计划的拆迁和预留, 避免了不必要的重复建设和浪费, 还借用了城郊部分路段的高速公路路肩作为公交专用道, 效果极好。

哥伦比亚的波哥达、印度尼西亚的雅加达和苏腊巴亚、孟加拉国的达卡、巴西圣保罗、印度的班加罗尔、澳大利亚的悉尼、加拿大的渥太华、墨西哥城等等, 世界各地越来越多的城市加入到 BRT 的行列。表 2-3 为国外部分城市运用 BRT 后的城市交通改善情况。

表 2-3 国外部分城市 BRT 运营状况

城市	中心城市人口 (百万)	运行时间缩短 (%)	高峰小时客流量 (万人次/h)
库里提巴	2.6	--	8000-20000
西雅图	1.8	33	--
波哥大	5.0	32	20000 以上
洛杉矶	9.6	23-28	--
渥太华	0.7	--	8000-20000

目前我国对于快速公交系统实施仍处于起步阶段。虽然中国的许多城市已经开始建造和使用公交专用道, 但是由于其他配套设施(如公交优先的信号设置、特定公交站等)还没有实施。中国的 139 个城市已经设置了 1232 条公交专



图 2-1 北京快速公交

用道, 不同类型的公交专用道使得公交车的车速提高约 12%—18% 对交通问题的解决起到了一定的作用。

2004 年 12 月 25 日北京快速公交 1 线的顺利开通。快速公交 1 一期工程, 全长 5 公里, 从木樨园到天安门广场南端前门, 共

设 5 站。快速公交引入高品质、现代化车辆,车长 18 米,采用左开门、铰接式,载客人数高达 200 人/辆;车辆达到欧 III 排放标准,并装备了 GPS 卫星定位终端设备。车站站台与车辆底盘平齐,乘客上下车可水平登降;车站设置了专门的残疾人车位和进出站坡道,方便残疾人乘车。快速公交采取站台售票方式。快速公交的平均运营速度为每小时 25 公里,单程平均运行时间为 12 分钟。

目前北京市快速公交 1 号线采用全时段、全封闭的 BRT 专用道、具有很大的灵活性,全线工程采用边建设边开通的形式。快速公交一线的乘客可在前门方便地换乘地铁,在沿线各车站也可方便地换乘普通公交线路。快速公交一线采用站下收费的方式,减少了旅客上下车的时间。

快速公交二期工程,从木樨园到德茂庄,全长 10.8 公里,全线为封闭式专用道。现正在紧张设计施工中,预计竣工时间为 2005 年底。

成都也已完成了快速公交系统发展规划,其他一些城市正在编制发展快速公交系统的规划。

2.2.3 BRT 系统的优点

在现有的各种公共交通运输方式中,地铁、轻轨、普通公交等交通方式在各种技术指标上面各有优缺点,表 2-4 为快速公交系统与地铁及轻轨在技术经济指标上的对比情况。

表 2-4 快速公交系统、轻轨和地铁的技术经济比较

指标	快速公交	轻轨交通	地铁
路面特征	专用道或混合流车道	专用车道或混合流车道	专用车道
站距 (m)	350-800	350-800	500-2000
车厢座位容量 (个/车)	40-120	110-250	140-280
正常行驶速度 (km/h)	20-40	20-45	20-40
安全性能	高	高	极高
立项到开工时间	1 年	2-3 年	3-5 年
立项到完工时间	1-2 年	3-4 年	5-6 年
系统的灵活性	高	低	低
平均每公里造价 (亿美元/km)	0.06-0.15	0.12-0.34	1.2-1.8
最低城市人口 (万人)	75	100	200
最低市中心人口 (万人)	40	50	70

由此可见，BRT 系统通过新型大容量的交通工具、专用路权、交叉口信号优先、ITS 等交通运营管理方式，与其他交通方式相比具有以下优点：

1、容量大。

BRT 系统独特的大容量公交车辆使得单车载客率上升，同时公交专用道的采用和交叉路口优先权的赋予使公交系统的车速加快，因此 BRT 系统单方向小时断面流量将有较大的提高，可达到与轻轨系统大致相当的运力。具体如表 2-5 所示。

表 2-5 快速公交与轨道交通运营能力比较

城市	形式	高峰流量 (万人/小时/方向)
香港	地铁	8.1
圣保罗东线		6.0
圣地亚哥		3.6
伦敦		2.5
圣保罗	快速 公交 系统	6.1
波哥大		5.3
阿雷格里港		3.3
库里提巴		1.5
曼谷	铁路	5.0
墨西哥		3.9
科伦坡	轻轨	3.0

2、投资低。

BRT 系统采用路面行驶的方式，一方面不需引入轨道专用的车辆，另一方面只需对现有的道路进行改进，不用修建轨道，土方工程量较小，因此系统的初期成本较低，建设速度快。2001 年 9 月，美国通用会计师事务所（General Accounting Office）受美国联邦运输管理委员会（The Department of Transportation of Federal Transit Administration）的委托，对美国 13 个城市已建的 18 条轻轨和 4 个城市中的 9 条公交专用线的调查统计，轻轨系统每英里的平均投资 3,500 万美元，公交专用线每英里投资 1,500 万美元。

3、灵活性好。

BRT 系统不使用轨道，因此无需形成完备的专用道网络，所以线网可分阶段实施，交叉口信号优先、乘客信息系统等技术也可以逐步引入。同时，路面行驶方式保证了线路可以被较方便的修正或更改，甚至在所吸引的交通流量达到系统上限时，可利用专用道建设容量更高的轨道交通系统。

4、充分考虑到了乘客的需求。

新型的公交车辆车内宽敞、噪音振动减少，乘坐更为舒适；而水平登车系统的采用，使公交乘客能够方便的登车，尤其是对携带包裹的乘客和行动不便者更是如此。此外乘客信息系统的采用，使乘客能了解公交系统乃至整个交通系统的情况，减少了不确定性，有效增加了乘客对公交方式的信任度。

5、速度快，准时性高。

BRT 系统采用公交专用道行驶，并在交叉口处具有优先权，因此受其它交通方式的干扰较小，车辆速度高，易于和计划时间表保持一致。此外水平登车系统和车外售票系统使公交车辆在车站内的等待时间减少，行程时间缩短，车辆的平均速度提高。

6、安全性高。

专用道和交叉口优先使 BRT 系统与其它交通方式完全分离，减少了拥堵时可能发生的追尾、碰撞等事故的可能；而车队管理系统中车内及站内安全系统的设置，更进一步减少了抢劫等暴力行为的发生；同时车辆追踪系统和交通事故管理系统的采用，使得在事故发生时能够及时迅速的救援，增加了对乘客人身安全的保护。

7、污染小，耗能少。

新型公交车辆的设计，使得低耗能、低排放成为可能；同时专用道和路口优先提高了车速，避免了拥堵时反复的加减速和停车，也能有效的减少车辆的废气排放。

2.2.4 BRT 系统的适用模式

快速公交在城市公共交通系统中的运用的形式可以根据各个城市的交通需求、城市土地规划及城市的财政状况来决定。快速公交的适用模式可以归纳为：

（1）快速公交成为整个公交的主体

这种公交发展模式是建立完整的快速公交网络覆盖城市的大部分区域。快速公交网络主要包括 BRT 专用道以及 BRT 换乘设施。同时 BRT 系统的票价政策可采用与地铁类似的收费办法，即在整个系统中采用统一的收费标准。

（2）快速公交应用于地铁或轻轨的延伸

有些城市在建设轨道交通时盲目地将线路延伸到城市边缘，从城市用地、

客流需求或是道路交通状况等方面可能建设轨道交通是不经济的。因为虽然根据城市的远期总体规划,在轨道交通服务范围内会有较大幅度的土地开发及人口与职工数的增加,但是近期的客流需求可能不需要使用轨道交通。另外由于是城市边缘或是城市新可发区,建设快速公交所需要的道路条件较成熟。因此可以使用快速公交作为轨道交通的延伸来降低投资与公交运营成本。快速公交的终点与轨道交通的起点紧密地结合在一起。美国迈阿密市的第一条快速公交走廊是采用这一形式。该市的 13.6 公里的边侧快速公交专用道造价为 8,500 万美元,如建地铁其造价将高达 9 亿美元,建轻轨造价将高达 4 亿美元。该市的 BRT 系统建成以后乘客数提高了 40%。

(3) 快速公交作为建设地铁或轻轨的过渡交通方式

巴西大多数城市建设快速公交的初衷是希望为今后建设轨道交通保留必要的道路用地。他们将公交专用道建设在道路中央,为今后建设高架轨道交通保留空间。巴西建设快速公交是为了降低项目建设的初期投资与运营费用。

(4) 快速公交与地铁和轻轨的混合使用

地面快速公交与轨道交通共同组成城市公共交通系统的网络,这一发展战略已被世界上许多大型城市广泛应用。香港是采用这种发展模式的典范城市之一。这些城市在规划与建设轨道交通的同时大力推广地面快速公交系统的建设。快速公交线路的布置以及与轨道交通的换乘都是紧密结合起来。实施这一发展模式即可以充分发挥轨道交通的优势,同时可以充分发挥地面快速公交的优势,并且可以减低建设公共交通系统的建设成本与运营维修费用。

(5) 独立式的快速公交系统

独立式的快速公交系统指的是建设一条或多条互不关联的快速公交走廊,这种系统往往在快速公交建设初期被广泛使用。我国目前大部分的快速公交系统采用这种形式。随着快速公交系统的逐步发展与健全,独立式的快速公交可以改变成快速公交网络。为了尽量避免今后转变时可能面临的困难,最理想的发展模式是先编制城市总体的公共交通网络发展规划,然后根据城市财政状况与交通的实际需求分阶段的实施不同的走廊。这种发展模式可以保证这些独立的快速公交走廊是整个公共交通系统中不可分隔的组成部分。

第3章 BRT 系统的路权分配

3.1 BRT 专用道（路）的分类

快速公交系统的运营速度与运营能力主要取决于 BRT 专用道路或车道的设置方式。全封闭的公交专用道路能提供大容量与快速的公交服务，如果配合路口信号优先系统，BRT 系统的服务水平将可以达到轻轨的服务水平。

BRT 专用车道的设置可避免 BRT 车辆与其他车辆混合使用，减少或是消除了 BRT 车辆与其他车辆产生冲突而带来的延误，在日益拥挤的城市道路系统中提高公共交通的运营速度。

目前 BRT 公交专用道路的设置方式主要包括：全封闭的高架公交专用道路、全封闭的公交专用地道、地面公共交通专用道（路）。美国的 FTA 对世界上 26 个国家的快速公交系统统计发现大多数城市都是采用地面公共交通专用道(路)，约占到了 85%。

1、全封闭高架 BRT 专用路

即在城市中修建专门为 BRT 车辆使用的高架道路。其优点是路权独立，封闭式道路，不受城市其它交通系统的影响。可像轻轨或地铁那样采用编列行车方式运营，如果配合上专门的新型车辆（如：大型电动铰链公交车）其运量和速度可以和轻轨相比，高架公共交通专用道上公共交通车辆的运营速度可达到 30km/h~40 km/h，其客运能力也可达 20,000~40,000 人次/小时^[14]。全封闭独立的公共交通投资却低得多，其建设投资仅为轻轨交通的 1/10 噪音污染较少。可以说高架公共交通专用道具有大容量灵活方便快捷等性能。

但对和现有公交系统相比投资较大，工期较长，不适合普通城市的公交系统改造。

2、高速公路上的公交专用道

为方便主城区与卫星城，相邻较近的城市之间的居民日常上下班等主要出行而开通的高速公共汽车专用路。公共汽车在此高速路上享有独立路权。其特点与高架公交专用道相似。

3、地面道路公共汽车专用道

它是指在道路上划出特定的车道供 BRT 车辆行驶，禁止其它车辆进入，使

得 BRT 车辆和其他社会车辆分道行驶, 以提高 BRT 车辆的行驶速度和服务水平。

BRT 专用道有许多不同的设计形式和运行模式。在城市中, BRT 专用道可以是全天运行的, 也可以是在高峰时段运行的。由于城市公共汽车线路一般集中在市中心地区, BRT 专用道也主要建在市中心地区。

目前地面道路公共汽车专用道的四种类型: 公共汽车街(Bus Mall)、沿街公共汽车专用道(Curb Bus Lane)、街中间公共汽车专用道(Median Bus Lane)、逆向公共汽车专用道(Contra-flow Bus Lane)。

美国国家交通研究署(Transport- action Research Board, TRB)对以上四类公共汽车专用道进行了专门的研究, 并提出了规划建议, 见表 3-1。不同城市和城市内的不同地区有不同的最低公共汽车流量和乘客量要求。

表 3-1 地面道路公共汽车专用道的公共汽车流量要求^[25]

类型	最低高峰小时单向公共汽车流量	最低高峰小时单向公共汽车乘客量	说明
公共汽车街	80~100	3200~4000	位于商业繁华地段
沿街公共汽车专用道	30~40	1200~1600	除了公共汽车专用道以外, 一个方向至少要有 2 条混合流车道
街中间公共汽车专用道	60~90	2400~3600	除了公共汽车专用道以外, 一个方向至少要有 2 条混合流车道
逆向公共汽车专用道	40~40	1600~2400	除了公共汽车专用道以外, 一个方向至少要有 2 条混合流车道

(1) 公共汽车街 (Bus Mall)



图 3-1 公共汽车街示意图

在商业繁华和公共汽车流量特别大的街道, 将整个街道变成公共汽车街, 除了公共汽车和行人以外, 小汽车禁止入内。这种方法可以改善街道环境, 增加公共汽车使用, 有利于居民出行。当然, 开辟公共汽车街必须有足够的公共汽车流量, 同时要制订小汽车改道计划和加强执法使得公共汽车街真正成为公共汽车行驶的地方。美国的波特兰市和丹佛市均有公共汽车街。

(2) 沿街公共汽车专用道(Curb Bus Lane)

沿街公共汽车专用道主要有两种形式：第一种形式是将现有停车道变成公



图 3-2 沿街公共汽车专用道示意图

共汽车专用道；第二种形式是将现有混合车道变成公共汽车专用道。将现有停车道变成公共汽车专用道不利于小汽车停车和商用车辆送货，对沿街的商家有直接影响。要减少这种负面影响，就要灵活地在个别商业集中地段允许部分商用车辆送货。当然，这些商用车辆送货完毕必须立即离开专用道以免影响公共汽车的行驶速度。将现有混合车道变成公共汽车专用道必须确保该专用道上公共汽车的

乘客量大于原来混合流车道的载客量，同时要确保专用道以外的剩余单向车道数大于或等于两条，以保证小汽车的换线和相互超车。在经常塞车的交叉路口，要禁止小汽车右转弯以保证公共汽车通行不受干扰。现有街道的宽度和公共汽车专用道的长度、街道重新划线和拓宽的可能、小汽车改道的可能、专用道上行驶的公共汽车和在交叉口的的小汽车右转弯之间的冲突以及附近的土地利用等均需要十分认真的评估。

(3) 路中公共汽车专用道(Median Bus Lane)

路中公共汽车专用道因为设在较宽街道的中间，受行人在交叉口步行和其



图 3-3 路中公共汽车专用道示意图

他车流的干扰较少，因此比沿街公共汽车专用道的行驶速度要快。街中间公共汽车专用道因为没有步行道供上下车之用，必须要在街中间建立行人岛作为车站以确保安全。同时要采取必要的措施保证行人安全地穿越马路。要禁止小汽车左转弯，或在交通信号灯控制上使得左转弯车辆和在公共汽车专用道上行驶的公共汽车分开。路中型公交专用道的特点：

优点：这种公交专用道的相对独立性较高，横向干扰少，几乎不受其他车辆的干扰。所以运行速度较快，配合新型公交车辆可以完成较高的运量。

缺点：直行公交车与其他左转车辆的冲突，必须禁止其他车辆左转或给其他左转车辆单独的相位^[15]；乘客进出站台区条件相对较差，必须穿过机动车道到达公交站，在车辆行驶速度较快时不安全，尤其当看到公交车到来想要过街上车时；所以必须设置过街天桥、或地下通道到达公交车站，增加了设置成本；由于要在路中设站所以对道路宽度的要求较高。

路中型公交专用道在没有专用超车道的情况下设站时应交错排列，便于公共汽车借用对向车道超车，以减少所占道路宽度、便于超车。为便于公共汽车在公交专用道上超车以提高公共汽车的运行速度与效率，减少公共汽车在公交专用道上的排队现象，可以在公交专用道的适当部位设置超车道。

路中型公交专用道多用于城市资金投入较多，道路较宽或进行大规模的城市道路改造或者在新建的主干道上设置公交专用道时。

(4) 逆向公共汽车专用道(Contra-flow Bus Lane)

逆向公共汽车专用道一般设在市中心区的单向街道上。公共汽车行驶方向和小汽车行驶方向正好相反。公共汽车专用道的方向要符合主要公共汽车线路



的运行方向,这样可以避免单向街通常带来的公共汽车绕道问题。在特定商业集中地段,有时也允许商用车辆使用专用道迅速送货。逆向公共汽车专用道要求有较高的公共汽车流量,使得小汽车使用者能直接看到逆向行驶的公共汽车。设计中要注意将公共汽车专用道和逆向混合流车道清楚地分开以防止撞车,同时使得行人

图 3-4 逆向公共汽车专用道示意图

警惕逆向而来的公共汽车。因此，在公共汽车专用道标志、执法、教育和交通管理方面要详细地规划和设计。洛杉矶市中心的春街就设有逆向公共汽车专用道。

在本文主要考虑的是路中型 BRT 专用车道。

BRT 专用车道（路）的采用，使 BRT 公交系统获得了独立路权，提高公交系统的独立性，并带来了以下几点好处：

(1) 成本低。公交专用道主要利用已有或废弃的路面, 技术简单, 路面维护成本较低, 也不需购置面向轨道的特殊车辆, 建设成本低。同时独立路权使得车辆运营速度增加, 所需车辆减少, 从而降低了固定资金和运营成本。

(2) 建设速度快。采用物理设施将公交专用道与其它车道隔离, 因此无需特殊立法, 同时利用已有的道路, 土方工程量较小。

(3) 建设运营灵活。因为公交专用道与普通车道采用同样的路面, 因此衔接性较好, 可分段实施, 也可将不同形式的公交专用道交替使用, 并且不同道路类型、不同公交车辆均可利用。

(4) 省时。由于公交占据独立路权, 因此相对于私人交通工具而言获得了较高的优先权, 行驶时间、等待时间均有所减少, 运营速度增加, 以人为单位的断面流量增加。

(5) 可靠性高。独立路权的采用, 使得公交系统运营过程中受其它车辆干扰的可能性减少, 公交车辆能较好的依照时刻表运行, 增加乘客的信任度, 并便于规划和预测。

应当指出, 当在城市主要交通走廊上设置了公交专用道之后, 私人交通的行驶空间减小, 行车环境会受到较大的影响, 因此在必要的条件下, 可以在主干道两侧的支路上配合设置私人车辆专用的单行线, 以保证私人交通工具的行驶空间。

3.2 路中型 BRT 公交车站的设计

根据车站在路中型 BRT 专用道中所处的位置, 可以分为站台设在两侧和中间两种。

(1) 车站设在 BRT 专用道两侧

站台设在 BRT 专用道的两侧供分上下行的车辆停靠。为了能较好的利用道路的使用空间, 使得 BRT 车辆能够在站台处超车, 站台一般是错开布置的, 同时乘客进出站可以利用人行横道和人行信号灯。但是站台利用率较低。具体如图 3-5 所示。

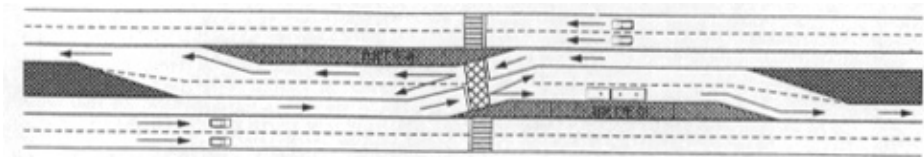


图 3-5 车站设置在路中型 BRT 专用道两侧

(2) 车站设在 BRT 专用道中央

站台设在车站的中央可以供双向的 BRT 车辆停靠使用。这种站台利用率高，节省了工作人员和设备。

但是当相反方向车辆同时到达时，双向同时上下车可能会造成混乱。另外由于站台设在道路的中央，对乘客的到达或离开造成了不便，并存在着巨大的安全隐患，因此需要设立专门的人行天桥或地下通道等。站台所处的位置要求 BRT 车辆的车门设置在左边。

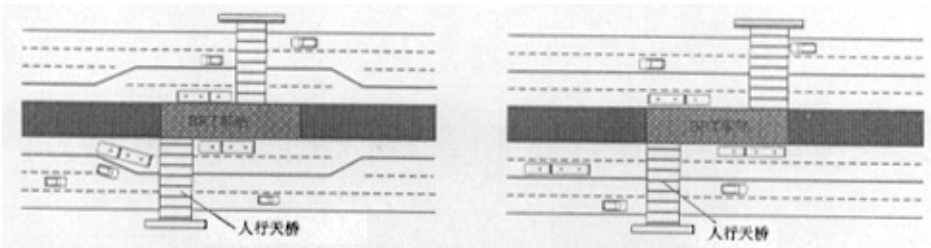


图 3-6 车站设置在路中型 BRT 专用道中央

由于 BRT 车站设置在中间对道路的红线宽度要求更大，同时进一步增加了基础设施的投资，在本文主要考虑的侧式站台。

3.3 路中 BRT 专用车道设置的基本条件

在 BRT 系统的运营实施当中是否能设置 BRT 专用车道将直接决定了 BRT 系统运营能力以及速度，同时也为进一步的实施 BRT 路口优先带来了重要的影响。

在国内目前大多数的道路由于其路面宽度较窄，而使得直接采用路中型的 BRT 专用车道存在着较大的困难，一般要对现有道路进行改建或者是在新修道路上采用。

为了使设置 BRT 专用车道成为可能，同时有效地利用道路空间资源，一般

认为, 设置 BRT 专用车道应具有以下基本条件:

3.3.1 道路条件

一般情况下, 对于普通的公交专用道的设置应满足以下条件^[20]:

(1) 路段公交客流量较大, 或者设置 BRT 专用道后能够吸引到足够的客流量。因为公交优先不是单纯的公交车的优先, 而是使公交车出行的人的优先, 应符合“以人为本”的原则;

(2) 道路通行能力能够基本满足设置专用道后社会车辆的交通需求。因为公交优先通行的同时不应给社会车辆造成严重的延误, 如果路段的车流量已接近或超过通行能力, 则不宜设置公交专用道;

(3) 路段要满足一定的长度, 如果交叉口间距较短, 则公交车受车辆转弯影响较大, 专用道不能很好地发挥作用。这种情况下可以只设置公交专用进口道;

(4) 路侧横向干扰较少, 当道路上有大量的社会车辆需要进出该路段的建筑物, 或者有路边停车场时, 公交专用道也不能发挥效用。

综合来说, 在车道数较多, 通行能力够大, 路侧条件较好的路段, 当公交客流量或公交车流量很大时, 有必要设置公交优先专用道。

由于 BRT 系统采用的是新型的大容量的公交车辆, 同时它的行驶速度远大于常规公交车的行驶速度, 这使得 BRT 专用车道的设置在道路条件方面更加的苛刻。

一、路段机动车道数

在路段车道数未增加的情况下, 设立 BRT 专用道将会使其他车道的交通流量增加, 造成其他车道负担加重。那么在设置公交车专用道的路段上道路条件必须保证在设置公交专用道后, 非公交专用道的通行能力能够满足剩余交通量的需要。

设路段单向机动车道数为 n , 单向 BRT 专用道车道数为 n_b , 在未设 BRT 专用道之前, 单向路段交通量为 Q_0 (pcu/h), 其中小汽车交通量为 Q_1 (pcu/h) 为了简化计算, 可认为每条车道分担的交通量均等, 即每条车道分别承担的交通量为 Q_0/n 。

当设置 BRT 专用道后, 对于整个路网来说, 交通流的分布是动态变化的, BRT 专用道设置的设置将会提高道路的饱和度, 增加其他车辆出行的广义费用, 这时其他机动车将可能向其他道路转移。假设单向路段交通流量为 Q_0' (pcu/h), 其中小汽车交通量为 Q_1' (pcu/h), 单向 BRT 车辆交通量为 Q_b (pcu/h)。此时每条其他车道流量 $\bar{Q}_{\text{非}}$ 为:

$$\bar{Q}_{\text{非}} = \frac{Q_0' - Q_b}{n - n_b} \quad \text{pcu/h} \quad (3-1)$$

在设置 BRT 专用道后其他车道的通行能力必须满足其他车辆在路段上通行的需要, 即其他车流量小于该车道的的设计通行能力 C , $\bar{Q}_{\text{非}} \leq C$ 。从而得到:

$$\frac{Q_0' - Q_b}{n - n_b} \leq C \quad (3-2)$$

解公式 (3-2) 得:

$$n \geq \frac{Q_0' - Q_b}{C} + n_b \quad (3-3)$$

因而为了能够满足 BRT 系统的正常运行, 在即将实施 BRT 车道的道路车道数应满足该条件, 同时对于那些需改建道路或新建的道路上实施 BRT 系统时, 路段设置的车道数也应满足公式 3-3。

考虑到路段交通量的转移, 在实施 BRT 时, 同时考虑其他车道上车辆仍有足够的道路空间超车和交织等问题, 一般认为车道数至少每个方向应由 2 条以上的机动车道。

二、机动车道宽度的要求

1、BRT 专用道的车道宽度条件

对于普通的公共汽车车辆宽度一般为 2.5m^[21], 据文献^[22]建议公交专用车道的宽度为 3.5m, 交叉口处由于速度降低宽度视具体情况可减至 3m。

BRT 车道的宽度主要取决于设计车速、车辆宽度和运营特征。由于 BRT 车辆速度较快, 在一般情况下其宽度为 3.30~3.75m^[23]。在本文主要考虑的是侧式站台(具体如图 3-5 所示)。在 BRT 公交车站间, BRT 车道总宽度应达到 10~15m 以保证超车, 在站台处的总宽度可达到 23m (包括 BRT 车道及站台等)。

2、其他车道宽度

在城市道路建设中, 车道宽度一般在 2.75m~4m 之间^[20]。目前我国城市主干道车道宽度一般为 3.5m。

在路段上设置 1 条 BRT 专用车道, 保持 2 条机动车道, 其机动车道路横断面尺寸情况如图 3-7 所示。此时, 机动车道宽度至少为 37m。

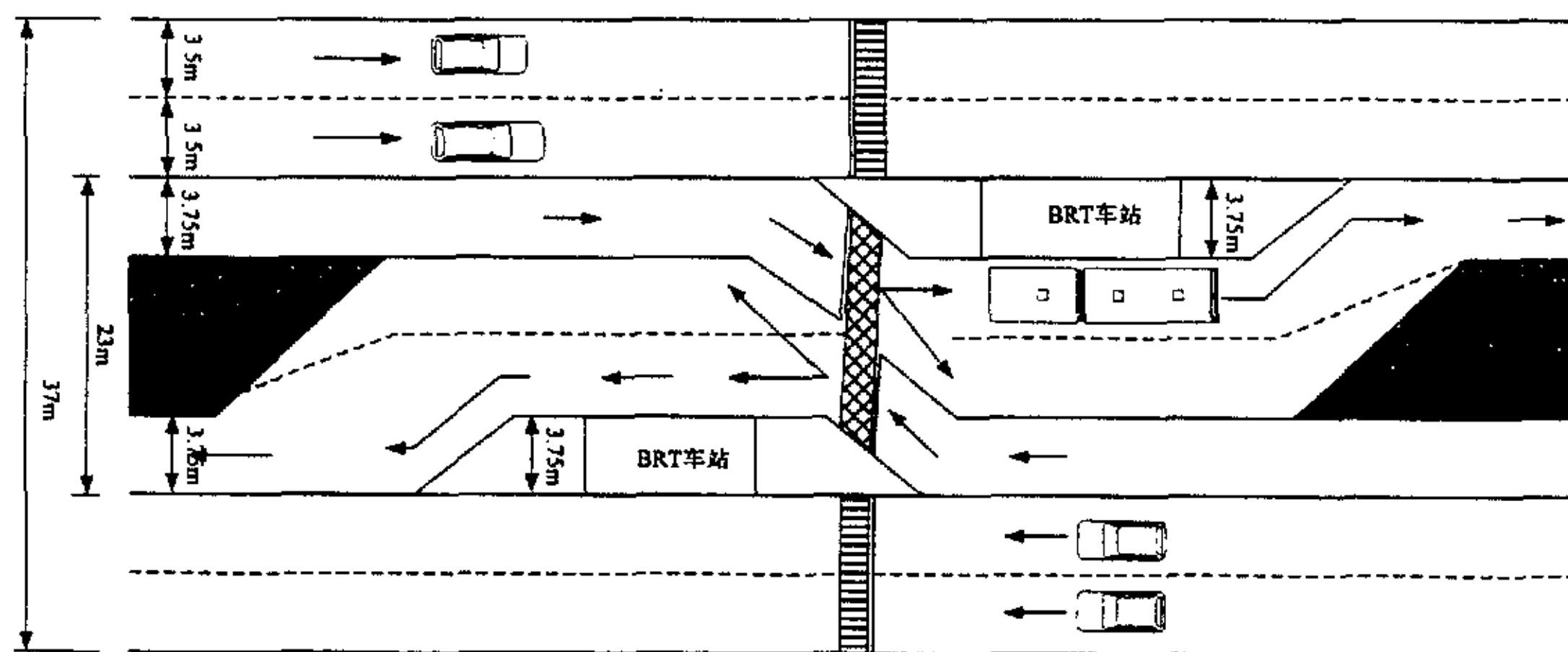


图 3-7 设置 BRT 专用道机动车道参考尺寸图

3.3.2 交通条件

设置 BRT 专用车道的道路, BRT 车辆的流量应达到一定的标准, 保证对道路空间充分利用, 同时减少对其他车辆的影响, 降低总的出行时间。

一、一条非 BRT 专用道机动车道的设计通行能力

1、不受平面交叉口影响的一条机动车道的设计通行能力 C_m

$$C_m = \alpha_c C_p (\text{pcu/h}) \quad (3-4)$$

式中 α_c ——道路分类系数, 数值见表 3-1

C_p ——一条车道的可能通行能力。

表 3-1 机动车道的道路分类系数^[16]

道路分类	快速路	主干道	次干道	支路
α_c	0.75	0.80	0.85	0.90

当在一个方向上的机动车道有两条或多于两条车道时, 车辆之间存在着超车和交织的现象, 这时候车辆间的干扰较大, 对位于外侧位置的车道通行能力应予折减。通常以靠近中线的第一条车道的通行能力作为 1 (即 100%), 第二条车道的通行能力为第一条车道 0.85, 第三条车道的通行能力则为 0.79, 第四条车道为 0.61。考虑多车道影响时的不受平面交叉口影响的一条机动车道的设计通行能力为:

$$C_m' = C_p \cdot \alpha_c \cdot \alpha_m \quad (\text{pcu/h}) \quad (3-5)$$

C_m' ——多车道影响时的不受平面交叉口影响的一条机动车道的设计通行能力

α_c ——道路分类系数

C_p ——一条车道的可能通行能力

α_m ——通行能力车道折减系数。

2、受平面交叉口影响的一条机动车道的设计通行能力 C

城市道路上, 因为交叉口之间的距离近, 车流不能连续通行, 因此对车道设计通行能力还应予以修正, 修正系数主要受交叉口之间距离与信号灯配时的影响, 称为交叉口折减系数 α_a , 公式如下^[16]:

$$\alpha_a = \frac{l / \frac{v}{3.6}}{l / \frac{v}{3.6} + \frac{v}{7.2a_m} + \frac{v}{7.2b_m} + \frac{t_c - t_g}{2}} \quad (3-6)$$

式中 α_a ——交叉口折减系数, 是无阻时的路段行程时间和实际行程时间之比值;

l ——交叉口的间距 (m);

v ——计算行车速度 (km/h);

a_m ——启动时平均加速度, 小汽车采用 0.8m/s^2 , 混和车辆采用 0.5m/s^2 ;

b_m ——制动时平均减速度, 小汽车采用 1.7m/s^2 , 混和车辆采用 0.5m/s^2 ;

t_c ——交通信号周期 (s);

t_g ——绿灯时间 (s)。

则 C 为:

$$C = C_m \cdot \alpha_a$$

$$C = C_p \cdot \alpha_c \cdot \alpha_m \cdot \alpha_a \text{ (pcu/h)} \quad (3-7)$$

二、建立公交专用道的公共汽车流量下限

1、首先计算一条机动车道行驶饱和小汽车流时运送的旅客人数

设一辆小汽车平均载客数为 \bar{p}_1 人/辆, 则一条机动车道的饱和小汽车流运送旅客数为:

$$\bar{P}_1 = \bar{p}_1 C = \bar{p}_1 N_p \cdot \alpha_c \cdot \alpha_m \cdot \alpha_a \text{ 人/小时} \quad (3-8)$$

2、计算 BRT 车辆载客人数

设一辆公共汽车平均载客数为 \bar{p}_b 人/辆, 单方向 BRT 车流量为 Q_b 辆/小时。

则单方向 BRT 车辆运送乘客数为:

$$\bar{P}_b = Q_b \cdot \bar{p}_b \text{ 人/小时} \quad (3-9)$$

3、公交专用道的公共汽车流量下限

为了节约道路资源, 公交专用道运输的乘客数必须大于一条机动车道行驶饱和小汽车流时运送的旅客人数, 即:

$\bar{P}_b \geq \bar{P}_1$, 从而得到:

$$Q_b \geq \frac{\bar{p}_1 \cdot C_p \cdot \alpha_c \cdot \alpha_m \cdot \alpha_a}{\bar{p}_b} \quad (3-10)$$

以图 3-7 中的道路为例, 单向为三车道。

各个参数取值方法如下:

在城市道路上机动车主要是公共汽车和小型汽车, 在设有 BRT 专用道的路段上其他车道主要是小汽车。在这里为了简化问题, 以小汽车为标准计算通行能力, C_p 取值为 1700 pcu/h^[16]。

一般 BRT 车道设置在城市的快速路和主干道上, 所以机动车道的道路分类系数取快速路与主干道分类系数的平均值 $\alpha_c = 0.775$ 。

由于在这里选择的实施 BRT 专用道的路段为单向三车道道路, 用一条车道作为 BRT 专用道, 则每一条非 BRT 专用道的平均折减系数 α_m 为 0.925。

α_a 的取值范围一般在 $0.47 \sim 0.74$ ^[16], 取其平均值为 0.605。

从而计算出一条非 BRT 机动车道的设计通行能力为 737pcu/h。

根据有关资料, 对于非公交机动车, 认为平均载客 \bar{p}_1 为 2.2 人/辆; 对于普通公交车, 认为平均载客 35 人/辆^[24]; 根据北京市目前所采用的 BRT 车辆容量, 可以认为 $\bar{p}_b = 200$ 人/辆。

一条非公交专用道机动车道在设计通行能力, 对于单纯行驶小汽车的情况平均每小时输送乘客数为: $737\text{pcu/h} \times 2.2 \text{ 人/辆} = 1622 \text{ 人/小时}$ 。这是 BRT 专用道 BRT 车辆所能输送乘客数的下限。折合成公交车流量为: $1622 \div 200 \approx 9$ 辆。从而得到:

$$Q_b \geq 9 \text{ 辆/小时}$$

因而, 仅仅只从减少道路资源占用的角度出发只有在路段上行驶的 BRT 车辆单向每小时大于 9 辆 (1622 人/小时) 时, 设置 BRT 专用道才有意义。

此计算过程是按照道路条件和流量水平进行计算的, 如果实际情况和此计算过程中的数据有较大差别, 则应该按照实际数据和此计算方法进行计算。

上述所分析的必要性界线是建立 BRT 专用道的最低流量限制条件, 并不是效益最高。

3.4 路中型 BRT 专用道交通影响分析

1、设置 BRT 专用车道前的路段交通量平均行驶时间

设置公交专用道之前, 社会车辆与公交车辆混合行驶, 由于公交车辆的平均行驶车速要低于社会车辆的平均车速, 社会车辆在低饱和度时需超越公交车, 在高饱和度时只能跟驰行驶, 影响其正常行驶车速; 同时公交车也由于社会车辆的穿插而受到干扰, 使行程时间增加。

根据美国联邦公路局 (Bureau of Public Road, BPR) 提出的路阻函数模型对路段交通量的平均行驶时间进行预测, 如式 3-11 所示。

$$t = t_0 [1 + \alpha (V/C)^\beta] \quad (3-11)$$

式中 t ——两交叉口之间的路段行驶时间 (min)

t_0 ——交通量为 0 时的路段行驶时间, 即路段的自由走行时间 (min)

V ——路段机动车交通量 (pcu/h)

C ——路段的实用通行能力, 即实际道路单位时间中可通过的车辆数 (pcu/h)

α, β ——参数, 一般取 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$

设该路段单向机动车道数为 n 条, 该方向的路段交通量为 Q_0 (当量小汽车) (pcu/h), 其中单向 BRT 车辆交通量为 Q_b (pcu/h), C 为一条机动车道的路段实用通行能力 (pcu/h)。为了便于计算, 可以假设认为每条车道分担的交通量相同, 此时每条车道将分别承担的交通量 Q_0/n 。此时 BRT 车辆的平均行驶时间 t_b 与其他车辆的平均行驶时间 t 相同, 即

$$t_b = t = t_0 [1 + \alpha (\frac{Q_0}{nC})^\beta] \quad (3-12)$$

t_b ——未设 BRT 专用道时路段上 BRT 车辆的平均行驶时间 (min)

t ——未设 BRT 专用道时路段上非 BRT 车平均行驶时间 (min)

C ——路段一条车道的交通容量 (pcu/h)。

2、设置 BRT 专用道后机动车平均行驶时间

当该路段该方向设置 n_b 条 BRT 专用道以后, BRT 车辆将与其他车辆在空间上分离, 此时, BRT 专用道上的交通流量为 Q_b (pcu/h), 其他车道上交通流量为 $Q_0 - Q_b$ (pcu/h), 该路段 BRT 专用道上 BRT 车辆的平均行驶时间为:

$$t'_b = t_0 [1 + \alpha (\frac{Q_b}{n_b C})^\beta] \quad (3-13)$$

式中： t'_b ——BRT 专用道上 BRT 车辆平均行驶时间

对于其他车道， $Q_0 - Q_b$ (pcu/h) 的交通量将由 $n - n_b$ 条车道来平均分担，
它他车辆的路段平均行驶时间为：

$$t' = t_0 \{1 + \alpha [\frac{Q_0 - Q_b}{(n - n_b)C}]^\beta\} \quad (3-14)$$

t' ——设置 BRT 专用道后其它车辆平均行驶时间

4、设置 BRT 专用道后路段平均车辆行驶速度的变化

设置 BRT 专用道后 BRT 车辆平均行驶时间减少为

$$\begin{aligned} \Delta t_b &= t_b - t'_b = t_0 [1 + \alpha (\frac{Q_0}{nC})^\beta] - t_0 [1 + \alpha (\frac{Q_b}{n_b C})^\beta] \\ &= \frac{t_0 \alpha}{C^\beta} [(\frac{Q_0}{n})^\beta - (\frac{Q_b}{n_b})^\beta] \end{aligned} \quad (3-15)$$

设置 BRT 专用道后其他车辆平均行驶时间增长为

$$\begin{aligned} \Delta t &= t' - t = t_0 \{1 + \alpha [\frac{Q_0 - Q_b}{(n - n_b)C}]^\beta\} - t_0 [1 + \alpha (\frac{Q_0}{nC})^\beta] \\ &= \frac{t_0 \alpha}{C^\beta} [(\frac{Q_0 - Q_b}{n - n_b})^\beta - (\frac{Q_0}{n})^\beta] \end{aligned} \quad (3-16)$$

5、路段上乘客的平均行驶时间的变化

BRT 系统实施的主要目的是体现公交优先的思想，但其目的并不是为了降低 BRT 车辆的运营时间，而是要使人的整体的出行时间缩短。

在本文当中为了简化问题，可认为小汽车的平均载客量为 2.2 人/辆，此外普通公交车的平均载客量为 35 人/辆，根据北京市目前所采用的改良了的 BRT 车辆，可认为平均载客 200 人/辆。

由于在城市交通中以公交车和小汽车为主，货车较少，在本文中忽略货车的影响。除了 BRT 以外的其他车辆的交通量 $Q_0 - Q_b$ 主要是由普通公交车和小汽车组成，假设小汽车所占比例为 γ ，一辆普通公交车可以换算为 2 辆小汽车，

那么普通公交车的数量为 $\frac{(Q_0 - Q_b)(1 - \gamma)}{2}$ 辆。

单向 BRT 交通量为 Q_b 为 BRT 车换算为当量小汽车流量, 所以必须将其还原为原始 BRT 车辆数。一辆 BRT 车辆相当于 3 辆普通的公交车, 所以 BRT 车辆交通量为 Q_b (pcu/h) 时, 车辆数为 $Q_b/6$ 。

(1) 路段上未设 BRT 专用道时总人小时数为:

$$T = 2.2(Q_0 - Q_b)\gamma + 35 \frac{(Q_0 - Q_b)(1 - \gamma)}{2} t + \frac{200Q_b}{6} t$$

$$T = t_0 [2.2(Q_0 - Q_b)\gamma + 35 \frac{(Q_0 - Q_b)(1 - \gamma)}{2} + \frac{200Q_b}{6}] [1 + \alpha (\frac{Q_0}{nC})^\beta]$$

$$T = t_0 [(17.5 - 15.3\gamma)Q_0 + (15.8 + 15.3\gamma)Q_b] [1 + \alpha (\frac{Q_0}{nC})^\beta] \quad (3-17)$$

T —— 路段上未设 BRT 公交专用道时总人小时数 (人小时)

(2) 路段上设置公交专用道后总人小时数为:

$$T' = 2.2(Q_0 - Q_b)\gamma' + 35 \frac{(Q_0 - Q_b)(1 - \gamma)}{2} t' + \frac{200Q_b}{6} t'_b$$

$$T' = t_0 (17.5 - 15.3\gamma)(Q_0 - Q_b) \{1 + \alpha [\frac{Q_0 - Q_b}{(n - n_b)C}]^\beta\} + \frac{200Q_b}{6} t_0 [1 + \alpha (\frac{Q_b}{n_b C})^\beta]$$

$$T' = t_0 \{ (17.5 - 15.3\gamma)Q_0 + (15.8 + 15.3\gamma)Q_b + \alpha(Q_0 - Q_b)(17.5 - 15.3\gamma) [\frac{Q_0 - Q_b}{(n - n_b)C}]^\beta + 33.3Q_b \alpha (\frac{Q_b}{n_b C})^\beta \} \quad (3-18)$$

(3) 路段上设置公交专用道前后的总人小时数变化量为:

$$\Delta T = T - T'$$

$$\Delta T = t_0 [(17.5 - 15.3\gamma)Q_0 + (15.8 + 15.3\gamma)Q_b] [1 + \alpha (\frac{Q_0}{nC})^\beta] - t_0 \{ (17.5 - 15.3\gamma)Q_0 + (15.8 + 15.3\gamma)Q_b + \alpha(Q_0 - Q_b)(17.5 - 15.3\gamma) [\frac{Q_0 - Q_b}{(n - n_b)C}]^\beta + 33.3Q_b \alpha (\frac{Q_b}{n_b C})^\beta \}$$

$$\begin{aligned}
& + 33.3Q_b\alpha\left(\frac{Q_b}{nbC}\right)^\beta \} \\
\Delta T = & t_0\alpha \{ (17.5 - 15.3\gamma)Q_0\left(\frac{Q_0}{nC}\right)^\beta + (15.8 + 15.3\gamma)Q_b\left(\frac{Q_0}{nC}\right)^\beta - \\
& (17.5 - 15.3\gamma)Q_0\left[\frac{Q_0 - Q_b}{(n - nb)C}\right]^\beta + (17.5 - 15.3\gamma)Q_b\left[\frac{Q_0 - Q_b}{(n - nb)C}\right]^\beta - \\
& 33.3Q_b\alpha\left(\frac{Q_b}{nbC}\right)^\beta \} \quad (3-19)
\end{aligned}$$

在实施 BRT 专用道后当 $\Delta T > 0$ 设置 BRT 专用道节约了路段总的出行时间。

6、BRT 专用道设置的最佳车流量

由于公交优先的根本目的是以人的出行时间缩短为目的的，所以对于实施 BRT 专用道后，应确定该专用道上 BRT 车流量占总交通量的最佳比例，已使得 BRT 车辆上乘客的总出行时间最少，同是也保证其他车道上的其它车辆上的出行者的出行增加量最小。假设 BRT 车辆占该方向道路总交通流量的比例为 x ，则 BRT 车辆的旅客出行总时间为

$$\begin{aligned}
T_b &= 200Q_b t'_b / 6 \\
T_b &= 33.3xQ_0 t_0 [1 + \alpha\left(\frac{Q_b}{nbC}\right)^\beta] \quad (3-20)
\end{aligned}$$

其他车道的非 BRT 车辆旅客出行时间增加量为

$$\begin{aligned}
\Delta T_0 &= 2.2(Q_0 - Q_b)\gamma\Delta t + \frac{35(Q_0 - Q_b)(1 - \gamma)}{2}\Delta t \\
\Delta T_0 &= Q_0 \frac{t_0\alpha}{C^\beta} (17.5 - 15.3\gamma + 15.3\gamma x - 17.5x) \left[\left(\frac{Q_0 - xQ_0}{n - nb} \right)^\beta - \left(\frac{Q_0}{n} \right)^\beta \right] \quad (3-21)
\end{aligned}$$

要保证 BRT 专用道实施后整体效益最好，则要求 BRT 车辆上乘客的总出行时间最少以及其他车道上的其它车辆上的出行者的出行增加量最小，此时令 $T_i = T_b + \Delta T_0$ ，当 $dT_i/dx = 0$ 时，求出相应的 x 值，即知 BRT 专用道上的最佳车流量比。

第4章 BRT 系统的交叉口运营模式分析

4.1 交叉口 BRT 优先的必要性分析

对于城市道路而言,交叉口是城市交通的关键。在交叉口,相交道路上运行的不同交通流在此选择和变换运行方向,是交通流的集散点,一旦交叉口处的交通组织不利并将造成了城市交通的瓶颈地带,影响路网的通畅。

BRT 系统为了能实现“快速”以及“高服务水平”仅仅只是靠公交专用道对路段上的运行时间进行控制是不够的,这样就要求能对交叉口的交通流进行有效的控制,以便实现 BRT 系统在城市交通网络上的优先。为了简化问题,本文主要将讨论十字交叉口的交通控制。

当 BRT 系统不享有优先权时,在交叉路口尤其是拥堵交叉路口处,BRT 车辆将受到相同方向及不同方向其它车辆的干扰,BRT 车辆在交叉路口内以及交叉路口附近将频繁的减速、停车,从而造成 BRT 车辆的延误,公交乘客出行时间也变长。另外,拥堵交叉路口产生的干扰导致公交车辆受控情况较差,车辆行驶很难与计划保持一致,即 BRT 系统服务的规律性和准时性得不到保证。同时难以在车辆间保持规则间距,从而造成 BRT 车辆的分散或聚集。BRT 车辆在采取传统的两相位信号控制措施的十字交叉口的车辆的运行情况如图 4-1 所示。

可以看到,如果不针对采用 BRT 系统的交叉口作出特殊的处理,而使用传统的两相位的交叉口信号配时,将会使得交叉口交通混乱,社会车辆与 BRT 车辆产生冲突的几率将大大增加,冲突点将由未设立 BRT 专用道的 2 个增加至 18 个,大大降低了交叉口的通行能力。可以看到其中有 14 个冲突点都是由于其它车辆左转弯而引起的,因而在 BRT 的交叉口,要特别注意对其他车辆左转的控制。

为了避免 BRT 车辆在交叉路口处的干扰和延误,BRT 系统的研究人员提出,应通过智能型的信号系统或具有高差的基础设施(隧道或高架)在交叉口处为公交车辆提供优先权。这样可以使城市快速公交系统具备以下优势:

- 1、较高的运营速度。

在交叉口处提供 BRT 优先权可以减少 BRT 车辆的停车时间和加减速时间

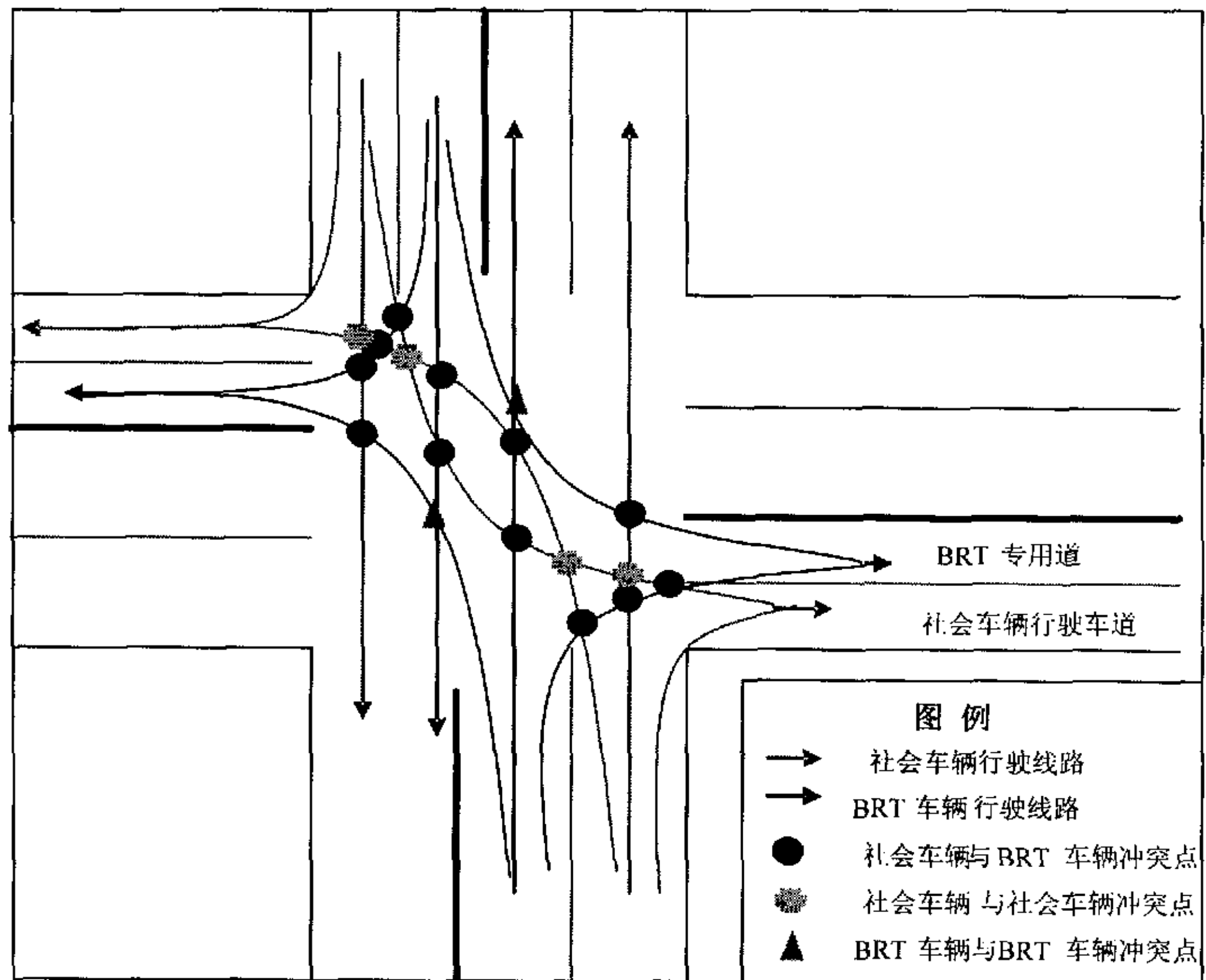


图 4-1 BRT 系统采用传统的二相位信号交叉口交通情况

损失，提高平均速度，从而减少 BRT 车辆的运行时间，而不需为了保证运营计划采用可能引起安全问题的提速法；

2、出行时间缩短。

对于普通的公交车辆，在已有的工程实例发现，对于给定的公交线路，当采用交通信号优先时公交乘客可节省 15—25% 的出行时间，同时设计良好的交通信号优先也能使公交车辆对私人交通的影响最小化，并减少公交车辆对其他车辆正常行驶的干扰；而 BRT 车辆车身长度更长（大概是普通公交车的 3 倍），如果不采用 BRT 车辆交叉口优先信号，对交叉口的影响可能会更大。

3、可靠性增加。

穿越交叉口时干扰减少，引起 BRT 车辆延误的可能性也大大减少，从而增加了 BRT 服务的规律性、准时性和可靠性；

4、运营成本降低。

由于车辆的速度增加，必将使得运营时间减少，那么提供同等水平的客运

服务所需车辆减少,也就是说,有可能在 BRT 车辆数不变的条件下增加服务频率来满足客运需求。

因而,在交叉口处对 BRT 车辆赋予优先权将使 BRT 公共系统具有准时性、减少了乘客的出行时间,与 BRT 专用车道配合使用,使得 BRT 车辆的运行能够与发车计划保持一致,从而提高了 BRT 系统的服务能力并降低了 BRT 公交系统的整体运营成本。同时 BRT 系统具有的优先性将给出行者带来良好的心理影响,从而使 BRT 系统更有吸引力。

4.2 BRT 系统交叉口运营模式

一般情况下,对于 BRT 系统所经过的交叉口在处理上可采用平面交叉信号控制和立体交叉两种形式,保证使得交叉口整体延误最小。

4.2.1 BRT 立体交叉路口

当交叉口比较繁忙,BRT 车辆以及社会车辆流量较大,交叉口基本到达饱和时,在交叉口对 BRT 车辆采用高架桥或是隧道对 BRT 车辆和其它车辆在空间上进行分流是一个较好的方法。

在立体交叉口,按照各辆 BRT 车辆的行驶路线,通过立交桥的各条匝道使得 BRT 车辆能够变换运行方向,实现与其他非 BRT 车辆不产生任何干扰,基本上没有延误通过交叉路口。图 4-2 为两条设有 BRT 专用道的主干路在交叉口的立体组织形式以及立交桥上 BRT 车辆的流向图。为了能进一步减少 BRT 车辆之间的冲突,提高立交桥的通行能力,在交通组织时可以设置所有转弯车辆一律在外侧行驶,所有过桥的车流在内侧车道上行驶。

同时其他车辆可充分利用 BRT 高架桥下的空间顺利的通过交叉口,进一步提高桥下交叉口的通行能力,从而提高了整体的服务水平,具体操作模式包括:

- 1、当桥下交通流量不大时,可以将路口的桥桩用护栏围成环岛,按环形交叉口交通组织模式对车辆放行。一旦交通量增加,发生堵塞,可以用环岛进出口信号灯加以协调控制。

- 2、当桥下转向车流量较大时,可以在桥桩间渠化,按多相位信号方式放行。

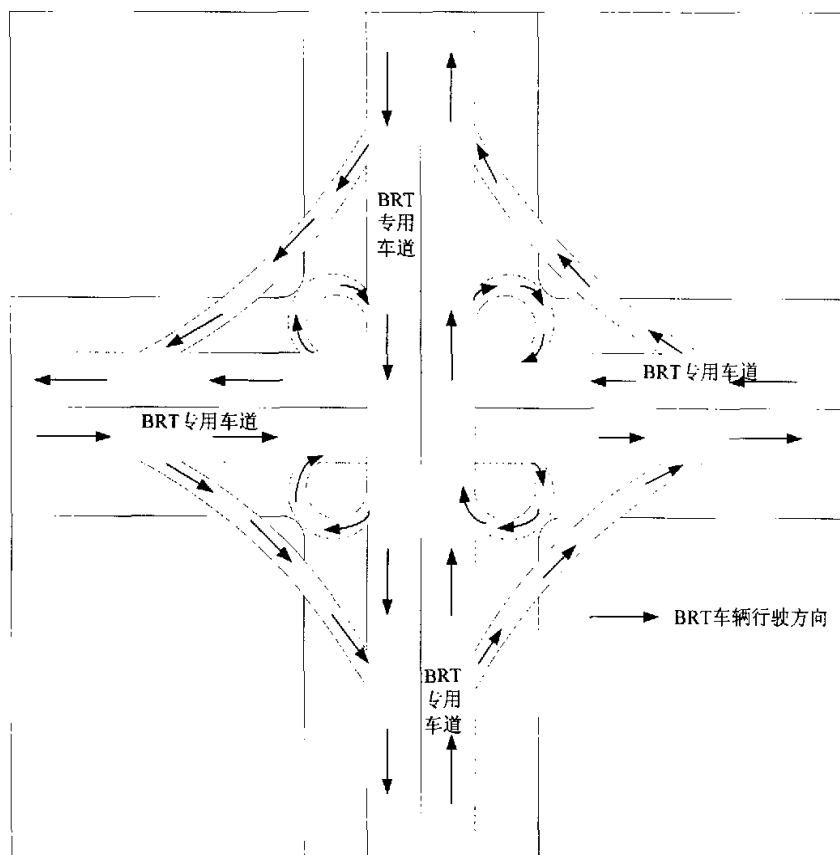


图 4-2 BRT 立体交叉口设置图

但是采用立体交叉口的缺点也很突出，主要存在着占地面积大、造价高等问题，对于土地资源紧缺的大城市不可能完全解决平面交叉问题，所以平面交叉仍是中国城市交叉口的主要形式，因此，平面交叉的管理和组织方法仍是缓解城市交通拥堵的重要研究课题。

4.2.2 平面交叉口信号控制

平面交叉口的 BRT 优先控制技术也可以体现在两个方面，即时间上的优先和空间上的优先。空间上的优先是指通过 BRT 专用车道使得 BRT 车辆在独立的、与其他车辆无干扰的专用车道上排队进入路口；时间上的优先是指 BRT 车

辆在交通信号上的优先政策。

目前常采用的平面交叉口 BRT 优先信号控制策略控制策略主要有以下四种：

1、被动优先策略

被动优先信号控制策略是在交叉口信号固定配时的基础上，在每个信号周期内增加专用的 BRT 信号相位，在该相位阶段只允许 BRT 车辆通行，从而达到优先控制的目的。具体的信号周期长度和 BRT 专用相位出现的时间，是根据 BRT 的平均行驶速度、发车频率、站点位置等因素来确定。为达到更好的控制效果，往往还需要对交叉口进行必要的渠化和管制，以减少 BRT 与其他机动车流的潜在冲突，如设置中间岛、禁止机动车左转等。

由于不用设置 BRT 车辆检测器等附加设备，实现该控制策略所需的成本较低。但当不是每个信号周期都有 BRT 车辆通过交叉口时，其有关的信号时间就会被浪费掉，同时造成交叉口整体延误时间的增加。因此，虽然被动优先控制策略在一定程度上可以提高 BRT 的运营效率，但在一般情况下并不推荐采用。

2、绝对优先策略

绝对优先的 BRT 信号控制类似于铁路列车通过交叉口时的独占式信号控制模式。在这种模式下，当安装在交叉口上游的入口检测器检测到有 BRT 车辆到达时，交通信号控制器就会中断当前的信号相位，直接给予 BRT 车辆通过信号；当交叉口下游的出口检测器检测到 BRT 车辆已通过交叉口后，再恢复原来的信号相位。这样当 BRT 车辆到达交叉口时就可以不减速地直接通过，实现 BRT 运行时的“一路绿灯”。具体如图 4-3 所示。

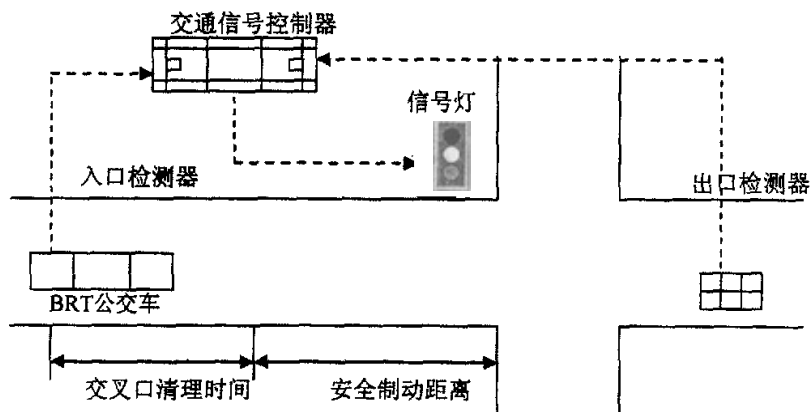


图 4-3 BRT 车辆检测器布置位置示意图

在绝对优先信号控制策略的实施中, BRT 车辆的检测是一个重要的因素。为保证控制系统的可靠运行, 要求 BRT 车辆检测器必须具有较高的准确性、灵敏性, 不能误检和漏检 BRT 车辆。目前国外 BRT 优先控制系统常采用的车辆检测方式主要有以下几种:

- (1) 利用路旁架设的雷达或超声波检测器检测 BRT 车辆位置;
- (2) 利用 BRT 专用道上设置的磁感应或光学装置检测 BRT 车辆位置;
- (3) 利用车载无线电发射器和地面接受器检测 BRT 车辆位置。

绝对优先控制策略可以确保 BRT 车辆在通过交叉口时不受任何延滞, 但对横向车流的影响非常严重。当交叉口的横向交通量较大时, 这种控制策略很容易引起交通阻塞。因此, 通常在交通流量较低的交叉口才采用这种控制策略。

3、完全优先策略

与绝对优先类似, 在完全优先控制策略中, 也需要在交叉口设置车辆检测器, 通过检测 BRT 车辆的位置确定是否给予其优先信号。但与绝对优先不同的是, 该策略并不是无条件地中断当前信号相位, 而是通过调整一个信号周期内不同相位出现的时间来达到使 BRT 优先通行的目的。

BRT 车辆检测器的具体安装位置可根据 BRT 平均行驶速度、交叉口清理时间及安全制动距离等因素综合确定, 信号优先过程包括四个阶段:

第一阶段: 确定公共汽车位置。确定公共汽车到达的地点, 以确定交叉口是否要进行信号优先。这一功能也提供位置数据给公共汽车上的处理器以确定汽车是否晚点。

第二阶段: 公共汽车向交叉口的信号机提出信号优先请求。由公共汽车上的处理器来执行, 对汽车到达预定点后是否要提供信号优先做出决定。决定的因素包括目前公共汽车所在的位置、公共汽车行驶的方向、公共汽车是否晚点以及汽车上的乘客数等。

第三阶段: 交叉口的信号机同意公共汽车提出的信号优先请求。是否给予信号优先取决许多因素, 例如, 一天里的时间, 手工强行使信号灯变绿的可能性, 当地的交通状况, 信号机的状况。这一过程一般在交叉口执行, 但在洛杉矶市控制的交叉口, 可能要通过市交通局的交通控制中心执行。一旦收到公共汽车优先的请求后, 需要有实时的交通数据来确定到底如何行动。

第四阶段: 实施信号优先。根据公共汽车和前方交叉口的相对位置, 通过信号机调整信号时相, 使得信号灯提前变绿灯, 或延长绿灯时间, 以便公共汽

车能够顺利地通过前方的交叉口。如果公共汽车到达时正好碰到绿灯，或者公共汽车没有晚点，那么信号灯相位保持不变。

也就是说，在完全优先控制策略中交叉口的信号等有两种基本的信号调整方式：

(1) 早断。当检测器检测到有 BRT 车辆接近交叉口时，若当前相位 BRT 方向的信号为红灯，则通过调整信号机时相，为 BRT 车辆提前提供绿灯；具体如图 4-4 所示。

(2) 迟启。对已经进入绿灯区的 BRT 车辆延长绿灯时间，使其能够顺利通过交叉口。如图 4-5 所示。



图 4-4 红灯早断

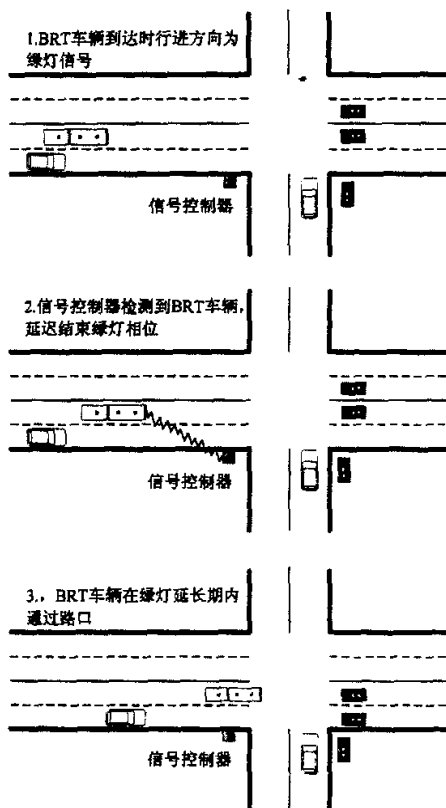


图 4-5 绿灯延长

通过早断和迟启等手段调整信号相位，可以为绝大部分的 BRT 车辆提供优先通行条件，同时对横向车流的影响较绝对优先控制策略减少。因此，这种控

制策略在国外 BRT 及公共汽车的优先信号控制系统中被广泛采用。

4、部分优先策略

在完全优先策略中，对每一辆 BRT 公交车都试图提供优先通行条件。当 BRT 班次较密时，可能会造成信号相位的频繁调整，对同向车流和横向车流造成干扰。因此，一些城市的交通控制系统采取有选择地为 BRT 车辆提供优先信号的策略，即部分优先策略。依据具体情况的不同，选择的标准可以是下列中的一种或几种：

(1) 对提前或准时的 BRT 不提供优先信号，仅对偏离时刻表的晚点车辆提供优先信号；

(2) 在高峰期为 BRT 车辆提供优先信号，平时不提供优先信号；

(3) 只对载客量超过一定数量的 BRT 提供优先信号，例如乘客超过 200 人的 BRT 车辆；

(4) 权衡 BRT 车辆延误与机动车延误，确定是否为 BRT 提供优先信号。

与完全优先策略相比，部分优先策略的适用范围更广。但实现该策略需要信号控制系统提供额外的附加信息，以确定何种车辆在交叉口能得到优先通行权，因而系统的整体成本会有所增加。

5、不同控制策略间的比较

表 4-1 从 BRT 车辆延误、横向车流延误、系统建设成本各个方面对前述四种 BRT 优先信号控制策略进行了比较：

表 4-1 BRT 优先控制策略比较

控制策略	BRT 延误	横向延误	系统成本
被动优先	高	低	低
绝对优先	低	高	较高
完全优先	较低	较高	较高
部分优先	较低	较低	高

在实际交叉口信号优先控制与设计当中，可以根据 BRT 系统在城市公共交通中所处的地位、交叉口其它车辆与 BRT 车辆所占的比例、交叉口的饱和度等等因素来决定应该采用哪种 BRT 优先控制策略。

4.3 对 BRT 运行线路的信号控制

前面所谈到的主要是对 BRT 车辆在单个交叉口的信号优化控制的组织形

式，它仅仅只是保证了在该交叉口 BRT 车辆以及整个交叉口乘客出行延误的最小化，而没有考虑整个 BRT 系统运行线路中整体效益的最优。

在实施 BRT 的城市道路上，交叉口信号灯的配时可以和 BRT 车辆的发车时刻表相对应，通过综合考虑 BRT 车辆行驶在专用道上路段所消耗的时间、各个交叉口的延误时间以及在停靠站上下客所花的时间等因素来确定，保证 BRT 能够行驶在绿波带上。使得 BRT 系统在整个运行过程当中实现整体效益的最优。当少数 BRT 车辆因为某些不确定因素而出现晚点的情况，可以采用前面所提到的方法对部分交叉口的信号周期进行微观的调控。

第5章 BRT 系统交叉口信号优化设计

由于对 BRT 系统在路权上给予了一定的优先,从一定程度上将会对其它的非 BRT 车辆造成一定的影响,增加这一部分出行者的延误,那么在 BRT 系统交叉口信号优化设计中,应该充分的考虑交叉口的饱和度以及各种车流量的比例情况,以交叉口实施 BRT 优先信号前后的总乘客延误减小为目标进行配时设计。避免在交通拥挤的情况下,由于给予 BRT 车辆提供了优先条件,而造成整个系统的交通条件恶化,这样不但会对其它车辆产生影响,也会对 BRT 车辆的运行造成恶性的影响。

5.1 假设条件

在对 BRT 系统交叉口信号进行优化设计时,为了能够简化问题,可以在以下几个方面进行假设:

1、BRT 系统采用路中专用道。

对于路中型 BRT 专用道来说,由于在交叉口入口处不受其他车辆转向的影响,BRT 专用道可以直接延伸到交叉口,此时不需要再专门设置公交专用入口引道来保证 BRT 车辆在平面交叉口“空间”上的优先^[12]。

2、公交车站设置在距离交叉口较远的路段上。交叉口进口道不受公交车停靠的影响。

3、在本文中,对交叉口的行人以及非机动车流量不进行考虑,主要考虑的是机动车道上的各类机动车,同时由于城市道路上主要是小汽车和客车,货车所占的比例较小,在这里也不考虑;

4、每辆接近交叉口的 BRT 车辆都能被检测到,并且可以通过驾驶员与监测中心联系了解该车辆的行驶方向;

5、BRT 车辆和其它车辆到达频率呈线性分布;

6、信号控制器具有良好的计算与判断功能,能够根据 BRT 车辆的到达情况调整各个相位的绿灯时间。

7、BRT 车辆是以恒定的速度经过交叉口。

5.2 信号交叉口乘客的总延误的确定

在信号交叉口, 车辆只能在有效绿灯时间内通过交叉口, 因此, 一个进口方向的通行能力为^[24, 27]

$$C_{ij} = S_{ij} \cdot \lambda_i \quad (5-1)$$

$$\lambda_i = g_i / C \quad (5-2)$$

式中: C_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的通行能力 (pcu/s)

S_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的饱和流率 (pcu/s)

λ_i ——为相位 i 的绿信比

C ——为交叉口的周期时长 (s)

美国《道路通行能力手册》HCM2000 推荐的饱和流率计算方法为

$$S_{ij} = 1710 \cdot P_{PHE} N_{ij} \quad (5-3)$$

式中: P_{PHE} ——为高峰小时系数, 可取 0.92

N_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的车道数。

交叉口进口方向的饱和度是进口方向车辆到达流量与进口方向通行能力的比值, 一个进口方向的饱和度为

$$x_{ij} = \frac{q_{ij}}{C_{ij}} = \frac{q_{ij}}{S_{ij}} \frac{C}{g_i} = y_{ij} \frac{C}{g_i} \quad (5-4)$$

式中: x_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的饱和度

q_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的车辆到达率 (pcu/s)

y_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的车辆流量比

进口方向的饱和度是判断其能否处理到达交通量的重要指标。当某进口方向的饱和度超过 1.0 时就不能处理到达交通量, 而需要采取调整信号配时方案,

改善交叉口的几何构造, 变更交通控制等措施。此外, 因为信号变化时刻会产生不能有效地处理交通流的时间 (损失时间), 而且车辆到达具有随机性, 所以如果某进口道的平均饱和度达到 0.9 以上, 事实上就很难顺利地处理到达交通量。在这种情况下, 该进口方向就会出现长的等待车队, 交通延误时间将会大大增加^[29]。

延误是反映车辆行车受阻、行驶时间损失, 在这里指的是 15 分钟每辆车的平均停车延误^[26]。其服务水平标准如表 5-1 所示。

表 5-1 信号交叉口服务水平标准

服务水平	每辆车停车延误 (s)	服务水平	每辆车停车延误 (s)
A	≤5.0	D	25.1~40.0
B	5.1—15.0	E	40.1~60.0
C	15.1—25.0	F	>60.0

根据韦伯斯特 (Webster) 延误计算公式进行计算, 确定 BRT 车辆与其他车辆的平均延误。其公式为:

$$d_{ij} = \frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i x_{ij})} + \frac{x_{ij}^2}{2q_{ij}(1-x_{ij})} - 0.65\left(\frac{C}{q_{ij}}\right)^{\frac{1}{3}} x_{ij}^{(2+5x_{ij})} \quad (5-5)$$

式中: d_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的每辆车的平均延误 (s)

C ——交叉口的信号周期时长 (s)

λ_i ——为相位 i 的绿信比

x_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向的饱和度 (%)

q_{ij} ——进口车道实际到达的交通流量 (pcu/s)

根据在设置 BRT 车辆优先信号前, 通过路中型 BRT 专用道将其他车辆与 BRT 车辆从空间上分离开来, 但是在同一进口方向上的 BRT 车辆与其他车辆应该具有相同的延误时间。假定 1 辆小汽车平均载客数为 P_1 , 1 辆普通公交车平均载客数为 P_2 , 一辆 BRT 车辆平均载客数为 P_b , 则交叉口在没有实施公交优先信号时该交叉口所有出行者的总延误为

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} D_{ij} = 3600 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} d_{ij} \cdot (Q_{ij1}P_1 + Q_{ij2}P_2 + Q_{ijb}P_b) \quad (5-6)$$

式中: D_{ij} ——为相位 i 时 j 进口方向 1 小时的乘客总延误 (s)

Q_{y1} ——为相位 i 时 j 进口方向的小汽车的到达率 (pcu/s)

Q_{y2} ——为相位 i 时 j 进口方向的普通公交车的到达率 (pcu/s)

Q_{y3} ——为相位 i 时 j 进口方向的 BRT 车辆的到达率 (pcu/s)

n ——为交叉口相位个数

m_i ——为相位 i 时的进口方向数量

5.3 BRT 车辆优先行驶的参数的确定

5.3.1 最佳信号周期时长的确定

在传统的交叉口信号配时方法中周期时长是以车总延误最小为目标来确定的。在 BRT 系统中要使得整体效益的最高, BRT 车辆的车均载客量远大于其他车辆, 那么在交叉口的信号配时可依据乘客的总延误最小来确定。因而基于 BRT 车辆优先通行的交叉口信号周期优化方法如式 5-7、5-8 所示:

目标函数为

$$\min D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} D_{ij} \quad (5-7)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n g_i + t_L = C \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \end{cases} \quad (5-8)$$

式中: t_L ——为交叉口每个周期的总的损失时间, s

C_{\min} ——为最短周期时长, 在各个相位的有效绿灯时间内至少要保

证车辆能安全通过交叉口所需最短时间, 因而最短周期必须由各相位最短绿灯

时间 $g_{i,\min}$ 决定, 即 $C_{\min} = \sum_{i=1}^n g_{i,\min} + t_L$

C_{\max} ——为最长周期时长, 由各相位允许的最长红灯时长来确定。

$g_i = C - r_i$, 可得到 $C_{\max} = \frac{1}{n-1} (\sum_{i=1}^n r_{i,\max} - t_L)$ 。调查和研究表明, 当周期时长超

过 120 秒时, 交叉口通行能力提高缓慢, 因此, 计算出的最大周期如果大于 120s, 建议取 120s。

5.3.2 绿信比的确定

为了能减少交叉口乘客的总延误, 绿信比的确定应该由乘客流量比和机动车饱和度来确定。也就是说绿信比正比于各个相位乘客的数量比。同时各相位的绿灯时间不得小于最小的绿灯时间, 即 $g_i \geq g_{i,\min}$ 。

可由式 5-9 来判断交叉口在满足各相位最小绿信比的前提下是否有过剩的绿灯时间

$$\Delta G = C - t_L - \sum_{i=1}^n g_i \quad (5-9)$$

式中: ΔG 为交叉口过剩的绿灯时间 (s)。

当 $\Delta G < 0$ 时, 表示交叉口通行能力不能满足现有交通需求, 没有过剩的绿灯时间; 当 $\Delta G = 0$ 时, 表示交叉口通行能力恰好满足现有交通需求, 没有过剩的绿灯时间; 当 $\Delta G > 0$ 时, 表示交叉口通行能力能满足现有交通需求, 且有过剩的绿灯时间。

当交叉口有过剩绿灯时间时, 将过剩绿灯时间按照各相位客流量在交叉口总的客流量中所占的比例分配给各相位

$$\Delta g_i = \Delta G \frac{P_i}{P} = \Delta G \frac{\sum_{j=1}^{m_i} (Q_{yb} P_b + Q_{y1} P_1 + Q_{y2} P_2)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (Q_{y1} P_1 + Q_{y2} P_2 + Q_{yb} P_b)} \quad (5-10)$$

式中: Δg_i ——为分配给相位 i 的过剩绿灯时间 (s)

P_i ——为相位 i 的客流量 (人/s)

P ——为交叉口总的客流量 (人/s)

那么此时, 各个相位总的绿灯时间 $g_i = g_{i,\min} + \Delta g_i$

由于 BRT 车辆的载客量大于其他车辆, 采用这种方法确定的各相位的绿信比将更有利于 BRT 车辆的通行。

5.4 周期固定时 BRT 车辆优先行驶时的信号配时

在实际操作过程中, 往往都是对几个交叉口交通进行联合控制, 保证对车辆能够实现线控。那么在对 BRT 系统进行信号优先控制与设计时, 应保持各个交叉口之间交通控制信号的协调, 几个交叉口的信号周期配置一般是统一的, 那么为了不破坏路网的一致性。交叉口的信号周期一般应是固定的。

5.4.1 BRT 交叉口信号优先的方式

假设入口检测器所处的位置距离交叉口 L 米, BRT 车辆在该路段行驶的车速为 v 米/秒, 则 BRT 车辆到达交叉口所需时间为 L/v 秒。当 BRT 车辆到达入口检测器时, 交叉口信号显示一般可能出现以下三种情况。

1、当 BRT 车辆到达入口检测器处时, 行进方向为绿灯

在该信号周期内, BRT 车辆到达入口检测器处时该方向的绿灯剩余时间为 g' 秒时

(1) 当 $g' \geq L/v$ 时, BRT 车辆可以直接通过该路口。

(2) 当 $g' < L/v$ 时, 考虑是否对该相位的信号灯绿灯时间延长, 找出让该路口乘客总体延误最小的时间差 Δg 秒。

当 $g' + \Delta g \geq L/v$ 时, BRT 车辆通过路口, 否则监控中心给驾驶员发出信号, 停车等候。

2、当 BRT 车辆到达入口检测器处时，行进方向为红灯

在该信号周期内，BRT 车辆到达入口检测器处时该方向的红灯剩余时间为 r' 秒时

(1) 当 $r' \leq L/v$ 时，BRT 车辆可以直接通过该路口。

(2) 当 $r' > L/v$ 时，考虑是否对该相位的信号灯的红灯时间缩短，找出让该路口乘客总体延误最小的时间差 Δt 秒。

当 $r' - \Delta t \leq L/v$ 时，BRT 车辆通过路口，否则监控中心给驾驶员发出信号，BRT 车辆停车等候。

在本文主要分析 BRT 车辆路过平面交叉口需要绿灯延长时的最长能延长时间以及此时交叉口的信号配时，以便使得整个交叉口的乘客延误时间最小。

5.4.2 交叉口乘客总延误的变化

为了能够简化问题，以一个四相位的十字路口为例，在这个交叉口中只有南北向道路设置了 BRT 专用道。为了能够使得 BRT 系统的效益最高，BRT 车辆只在 BRT 车道上行驶。该交叉口的信号配时如图 5-1 所示。可以看到只有在第一相位才有 BRT 车辆通过交叉口。假设每个相位的绿灯时间分别为 g_1 、 g_2 、 g_3 及 g_4 ，当 BRT 车辆到达交叉口，需要延长的绿灯时间为 Δg ，为了保持信号周期长度不变，就需要压缩其他相位的绿灯时长，其他相位的压缩值分别为 Δg_2 、 Δg_3 和 Δg_4 。此时 $\Delta g = \Delta g_2 + \Delta g_3 + \Delta g_4$ ，且 Δg 、 Δg_2 、 Δg_3 、 $\Delta g_4 \geq 0$

在没有使用 BRT 优先信号配时时，在一个信号周期内各个相位两个进口方向的乘客延误为

$$D_i = \sum_{j=1}^2 d_{ij} \cdot (Q_{ij1} P_1 + \frac{Q_{ij2}}{2} P_2 + \frac{Q_{ijb}}{6} P_b) \quad (5-11)$$

一辆普通公交车可以换算为 2 辆小汽车，一辆 BRT 车辆的长度是普通公交车的 3 倍，则 $q_{ij} = (Q_{ij1} + Q_{ij2} + Q_{ijb}) g_i$ 。

当 BRT 车辆行驶到车辆检测器时，相位 1 所剩的绿灯时间小于车辆到交叉口的行驶时间，即 $g' < L/v$ 时，对相位 1 的绿灯时间延长，其他各个相位的绿灯

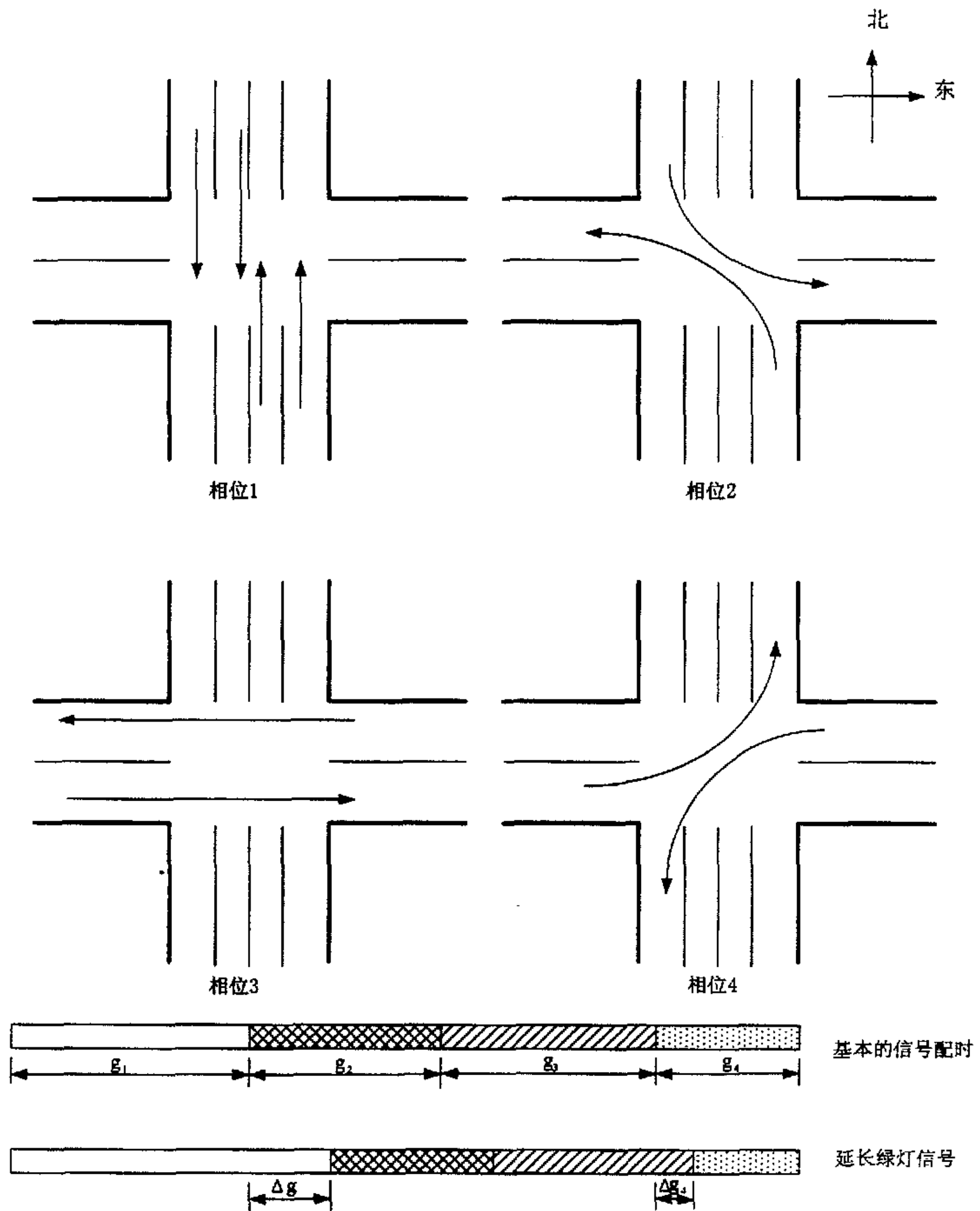


图 5-1 交叉口信号配时

时间相应的缩短，此时

$$D'_i = \sum_{j=1}^2 d'_{ij} \cdot (Q_{ij1} P_1 + \frac{Q_{ij2}}{2} P_2 + \frac{Q_{ijb}}{6} P_b) \quad (5-12)$$

$$\text{此时 } \lambda'_1 = \frac{g_1 + \Delta g}{C}, \quad \lambda'_2 = \frac{g_2 - \Delta g_2}{C}, \quad \lambda'_3 = \frac{g_3 - \Delta g_3}{C}, \quad \lambda'_4 = \frac{g_4 - \Delta g_4}{C}$$

从而可知, 为了保证相位 1 的 BRT 车辆不停车通过交叉口而将绿灯时间延长后, 相位 1 的所有乘客的延误时间减少, 而由于信号周期保持不变, 此时其他相位绿灯时间相应缩短从而使得这些相位的乘客延误增加, 为了保证有效地利用绿灯时间, 使得交叉口总乘客延误有所下降, 则要求实施 BRT 信号优先配置后, 交叉口乘客总的出行时间能够节约, 即

$$\Delta D = \Delta D_1 - (\Delta D_2 + \Delta D_3 + \Delta D_4) \geq 0 \quad (5-13)$$

式中: ΔD ——实施 BRT 信号优先后交叉口节约的乘客总的出行时间 (s)

ΔD_1 ——为相位 1 对正常绿灯时间末期即将到达路口 BRT 车辆绿灯延长后相位 1 乘客的节省的出行时间 (s)

ΔD_2 、 ΔD_3 、 ΔD_4 ——为相位 1 绿灯延长后相位 2、3、4 增加的乘客的出行时间 (s)

此时 ΔD 可以看作是 Δg 、 Δg_2 、 Δg_3 、 Δg_4 为变量的一个函数。

5.4.3 BRT 车辆检测器位置的确定

在提供 BRT 系统交叉口信号优先时, BRT 车辆通行方向的绿灯延长时间越长, 其他相位的车辆的延误就越大, 此时 ΔD 就会越小。BRT 车辆的监测器应该是在能检测出延长时间最长的 BRT 车辆的地方, 那么要确定监测器的位置, 首先就应求出绿灯延长的极限值。

目标函数为

$$\max \Delta g = \Delta g_2 + \Delta g_3 + \Delta g_4 \quad (5-14)$$

$$\text{约束条件为} \quad \begin{cases} \Delta g_2, \Delta g_3, \Delta g_4 \geq 0 \\ \Delta g_i \leq g_i - g_{i \min} \\ \Delta D = \Delta D_1 - (\Delta D_2 + \Delta D_3 + \Delta D_4) \leq 0 \end{cases} \quad (5-15)$$

可以得出 BRT 车辆检测器与交叉口停车线的距离为

$$L = (\max \Delta g)v \quad (5-16)$$

5.4.4 BRT 交叉口信号配时调整

在实际操作中, 车辆检测器能够检测到绿灯末期接近交叉口的 BRT 车辆在绿灯结束后需要多长时间能够通过交叉口, 此时 Δg 为已知量。此时需要找出 Δg_2 、 Δg_3 、 Δg_4 得知, 使得整体延误最小。即可得到目标函数

$$\max \Delta D = \Delta D_1 - (\Delta D_2 + \Delta D_3 + \Delta D_4) \quad (5-17)$$

$$\text{约束条件为} \begin{cases} \Delta g = \Delta g_2 + \Delta g_3 + \Delta g_4 \\ \Delta g, \Delta g_2, \Delta g_3, \Delta g_4 \geq 0 \\ \Delta g_i \leq g_i - g_{i\min} \end{cases} \quad (5-18)$$

因而交叉口信号周期固定不变的情况下, BRT 车辆信号优先配时调整的流程如图 5-2 所示。

此时对相位 1 的 BRT 车辆采用绿灯延长后, 各个相位的绿灯时间调整为

$$\begin{cases} g'_1 = g_1 + \Delta g \\ g'_2 = g_2 - \Delta g_2 \\ g'_3 = g_3 - \Delta g_3 \\ g'_4 = g_4 - \Delta g_4 \end{cases} \quad (5-19)$$

式中: g'_1 、 g'_2 、 g'_3 及 g'_4 为调整后各个相位的绿灯时间 (s)

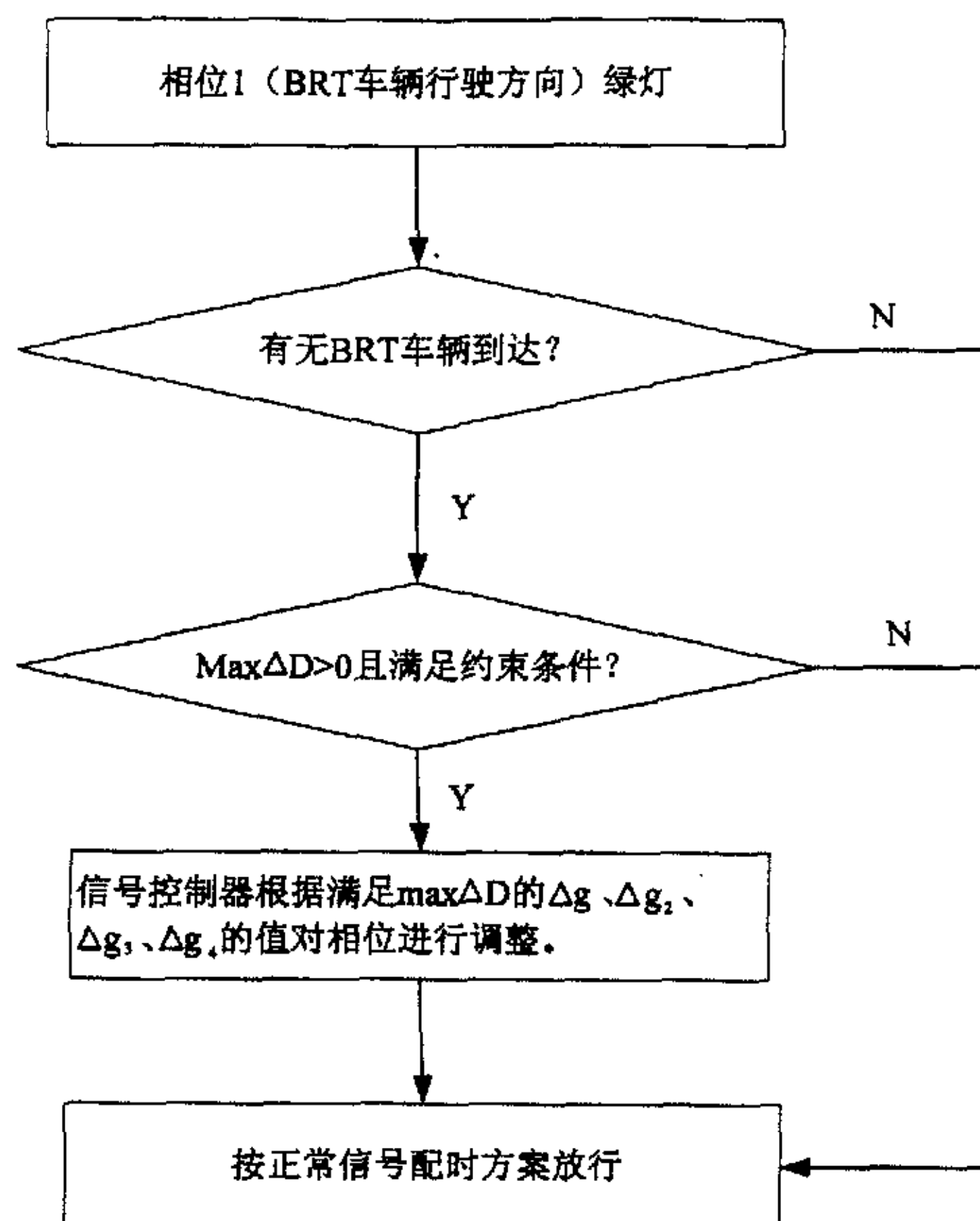


图 5-2 BRT 信号优先配时调整流程

第6章 实例分析

6.1 研究背景

目前成都市每年机动车增加约 10 万辆,其中私家车拥有量已超过机动车总量的 85%,并且还在以每年 10%的速度增长。机动车数量大幅度增长,而新建道路的增长速度无法与之相适应。解决这一问题的有效手段之一就是大力发展城市公共交通。但目前成都市城市公共交通存在着服务水平不高,速度不快,对市民缺乏吸引力,因而公共交通在城市交通中的分担率不大。目前成都市各种交通工具出行比重仅为公交:自行车:步行=11.1:43.2:30.3。常规公交虽然在现有道路上划出了专用道和优先道,但是无法满足市民日益增长的出行需求。BRT 的运力和运量介于常规公交和地铁之间,造价低,成为了解决成都市交通问题的有效的公共交通方式之一。成都市规划局计划首先从二环路开始进行改建实施。

成都市二环路于 1994 年建成使用,全长 28.3 公里。目前二环路已经从一条过境路变成了市区中心的一条主干道。目前平均行车速度仅为 22km/h,公交车的运行速度仅为 13.5km/h。

成都市规划局规划到 2005 年底将二环路改造成为成都首条快速公交线。改造后的二环路为机动车双向 8 车道,其中居中两条是快速公交专用道,红线宽度为 45-60m, BRT 车辆的平均行车时速将达到 25-30 公里。目前成都市公交集团已经向有关主管部门申请首批购车数量为 88 辆。

在规划中,对与二环路相交的车流量较大的主要的交叉口可以采用立交桥或隧道来对 BRT 系统进行优先控制,而对于二环路、次干道以及支路相交的交叉口如何实施 BRT 信号优先控制则是急需解决的问题。

本章将利用第 5 章所提到的方法对成都市二环路、解放路交叉口的信号配时进行优化控制与设计。

6.2 二环路 with 解放路交叉口情况简介

2004 年 8 月 4 日，西南交通大学对二环路 with 解放路交叉口的机动车的交通运行情况进行了调查分析，其结果见附表。经过统计计算，目前该交叉口各进口方向交通流率如表 6-1 所示。

6.3 二环路 with 解放路交叉口 BRT 信号优先控制与设计

以二环路 with 解放路四相位十字路口为例，由于只在二环路上设置了 BRT 专用道，那么 BRT 车辆只在二环路上路上行驶，此时 BRT 车辆只有直行车。其他车辆右转弯不受信号限制。其相位构成如图 6-1 所示，可以看出只在第一相位的时候有 BRT 车辆通行。

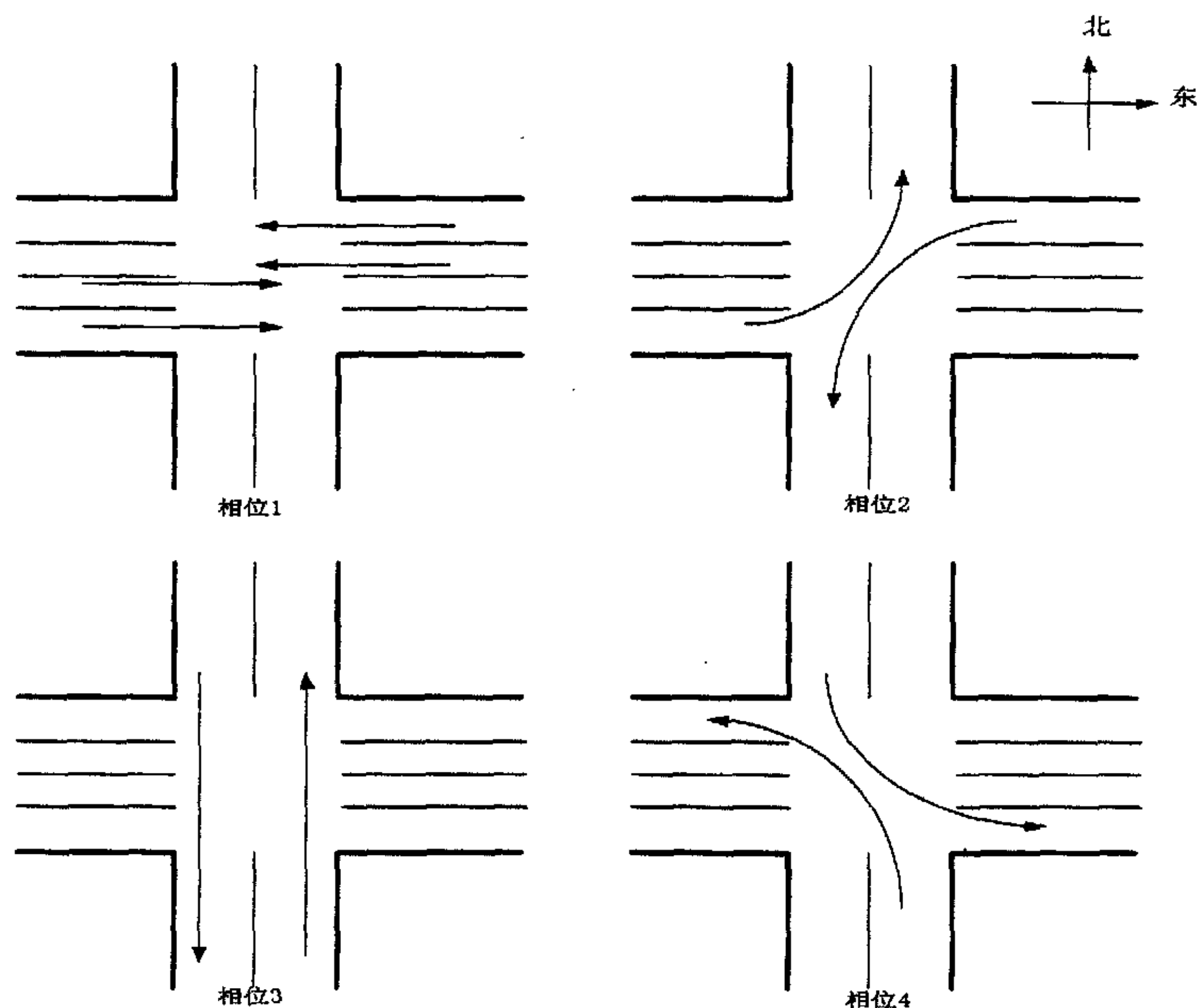


图 6-1 二环路 with 解放路交叉口信号配置

在本文当中为了简化问题,假设在二环路上实施 BRT 信号优先控制之后,二环路上直行的普通公交车全部采用 BRT 车辆,那么在采用 BRT 专用道后,BRT 车辆的小汽车换算交通量仍等于原先普通公交车的小汽车换算量,那么采用 BRT 系统后的交叉口的进口方向交通流率和进口道数量分布如表 6-1 所示。

可认为小汽车的平均载客量为 2.2 人/辆,此外普通公交车的平均载客量为 35 人/辆,对于改良了的 BRT 车辆,由于其容量较大,根据北京市 BRT 车辆的平均载客量可取值为 200 人/辆。取相位饱和度的上限为 0.9,相位 1 至相位 4 的最小绿灯时间分别为 15s、20s、15s 以及 20s,相位的损失时间 t_L 为 10s,则

$$C_{\min} = 80 \text{ s}.$$

没有考虑 BRT 车辆交叉口优先通过时,各相位的配时方案如表 6-2 所示。可以看到此时在一个周期内,其它车辆和 BRT 车辆的平均延误都是 40s。由于 BRT 车辆的平均载客数比其它车辆大得多,本交叉口实施 BRT 信号优先控制方式可以采用以下两种方式:

1.方案一:在信号周期设置时,对交叉口进行点控制,即不是基于车辆的总延误最小,而是考虑交叉口乘客总体延误最低来确定信号的周期时长,进一步确定各个相位的绿灯时间。根据 5.3 中的式 5-7、5-8 确定出最佳的信号周期时长,然后再根据 5-11 确定了各个相位的有效绿灯时间,计算结果如表 6-2 所示。

2.方案二:对交叉口实施线控制,即信号周期固定的情况下,利用公式 5-14、5-15,求出 BRT 行驶方向绿灯的最长延长时间。计算得出:当 $\Delta g_2 = 2 \text{ s}$, $\Delta g_3 = 4 \text{ s}$, $\Delta g_4 = 3 \text{ s}$ 时, $\max \Delta g = 9 \text{ s}$ 。此时由于在 BRT 车道上的 BRT 车辆的行驶速度 v 为 30km/h,那么可以确定 BRT 车辆检测器距离交叉口停车线的距离为

$$L = (\max \Delta g) v = \frac{25}{3} \times 9 = 75 \text{ m}$$

假设在绿灯尾有一辆 BRT 车辆到达交叉口附近,通过信号控制器判断,需要该相位的信号周期延长 $\Delta g = 7 \text{ s}$ (满足 $\Delta g < \max \Delta g = 9$),根据目标函数 5-17 以及约束条件 5-18,计算结果如表 6-2 所示。

表 6-1 信号交叉口特性

相位	相位 1		相位 2		相位 3		相位 4	
	东→西	西→东	东→南	西→北	南→北	北→南	南→西	北→东
交通流进行方向								
小汽车到达率 Q_1 (pcu/s)	0.08	0.103	0.018	0.044	0.091	0.106	0.023	0.044
普通公交车到达率 Q_2 (pcu/s)			0.001	0.019	0.015	0.017	0.004	0.005
BRT 车辆到达率 Q_3 (pcu/s)	0.023	0.027						
车辆离开时的饱和流量 S (pcu/s)	1.31	1.31	0.44	0.44	0.88	0.88	0.44	0.44
进口车道数/专用车道数	4/1	4/1	1/0	1/0	2/0	2/0	1/0	1/0
车流量比/专用进口道车流量比	0.079/0.018	0.099/0.021	0.043	0.143	0.120	0.140	0.061	0.111

表 6-2 信号交叉口配时方案比较

	周期时长 s	绿灯时长/绿信比/相位饱和和度						车均 延误	车均延误 与周期比	人均 延误	人均延误与周 期比
		相位 1	相位 2	相位 3	相位 4						
		东→西 西→东	东→南 西→北	南→北 北→南	南→西 北→东						
初始值	120	25/0.21/0.47	35/0.29/0.49	35/0.29/0.48	25/0.21/0.53	40	0.33	40	0.33		
方案一	112	28/0.25/0.40	30/0.27/0.53	30/0.27/0.52	24/0.21/0.53	32	0.29	26	0.23		
方案二	120	32/0.27/0.37	33/0.28/0.51	32/0.26/0.53	23/0.19/0.58	37	0.31	28	0.23		

第7章 结 论

7.1 主要结论

通过了解国内外在 BRT 系统的研究与实施的发展发现目前国内对于 BRT 系统的设计主要是基于国外已有的一些经验,对于 BRT 系统的路段上的专用路权以及交叉口信号优先方面该如何设置主要是基于已有的普通公交专用道设置以及信号优先配置的方法,而没有根据 BRT 系统的特点从理论及可操作性角度来分析如何设置才能使 BRT 运行线路整体效益最优。本文重点对基于 BRT 专用道的交叉口优化控制与设计方面进行了一定的探讨,主要结论如下:

1、城市公共交通系统以其人均动态占用路面面积少、人均造成的污染低等特点成为解决我国城市交通问题的主要途径。但是由于我国经济水平不够,发展城市轨道交通的能力有限,在总结 BRT 系统的各项优点并将其技术经济指标与轨道交通对比后,指出大力发展快速公交系统是目前解决城市交通问题的一个有效的方法。

2、通过对目前国内外主要采用的几种 BRT 专用道进行对比后,重点对路中型 BRT 专用道进行了一定的探讨,从道路条件以及交通条件两个方面对路中型 BRT 专用道设置的原则进行了分析,最后从路段上所有出行者出行时间最短的角度出发,计算出了实施 BRT 专用道后设置 BRT 专用道节约了路段总的出行时间以及 BRT 专用道上的最佳车流量比。

3、针对设置了路中型专用道的交叉口,对 BRT 系统在交叉口实施优先控制的必要性进行论证,指出目前交叉口的采用 BRT 优先控制的主要方式,并对平面交叉口信号优先控制的策略进行对比。在本文中还提出可利用 BRT 系统的发车时刻表来对 BRT 线路实施线控制。

4、从交叉口乘客总延误最小的角度出发,确定了在点控制时 BRT 系统在平面交叉口信号优先时的最佳周期时长,并计算出它对应的各个相位的绿灯时间;最后针对线控制的交叉口在采用绿灯延长的信号配置时,信号周期时长固定,对各个相位的绿灯时间调整使得乘客总延误最小,并且找出了车辆检测器设置位置。

5、通过对成都市二环路解放路路口进行 BRT 信号优先配时,对实际的运作起到了一定的指导作用。

7.2 进一步待解决的问题

在本文的研究中,由于个人水平的有限,在某些方面研究还不深入,不少内容显得有些肤浅,敬请各位老师和同学指正。

在进一步的研究当中,可就本文中的一些问题进入深入的探讨,包括:

1、本文虽然对单个采用了 BRT 的交叉口优先进行了一定的探讨,使得在该交叉口的 BRT 车辆及社会车辆的乘客的总延误最小,但是没有结合到整个城市道路网络进行研究,仍局限于孤立的“点”的控制,对整个“面”或“线”的控制考虑得较少。

2、本文虽然对路中型专用道的停靠方式进行了一定的探讨,但是还很不全面,对于停靠站的设置具体方式以及影响因素研究的较少,同时也只考虑了交叉口距离停靠站较远的情况,即没有考虑停靠站对交叉口的影响。

3、在对交叉口信号优先配置当中,为了简化计算,没有考虑到行人和非机动车,可能在实际应用中会需要进行修正。

4、在对交叉口以及路段上的交通量进行研究的时候,由于交通管理方式的改变,必将导致交通量在路网上的重新分布,而在本文中,只是基于静态的交通流来研究,没能深入的针对动态的道路网情况进行探讨。

致 谢

论文能够顺利完成，首先要衷心的感谢我的恩师张锦教授。在研究生三年的学习中，他不仅教给我做学问的方法，也教给了我做人的道理，对我以后的成长、发展起着重要的影响。论文从最初的概念地启蒙、选题、研究方法、框架的确定以及最后的定稿都得到了老师细心的指导。

感谢我的好朋友张南、张学尽、马啸来在学习和生活上对我莫大的支持和帮助。论文的写作过程中，通过交流和探讨给了我很多非常中肯的意见。感谢喻翔、金宝辉、毛敏、李犁峰、迟永林等师兄师姐在学习和生活中对我的帮助与鼓励。

感谢李春澜、王蓉和刘开元，他们既是我的同学也是我的朋友，在共同的学习生活期间，给了我很多的欢乐，一起走过的日子将成为我美好的回忆！感谢众位师弟、师妹，感谢他们在学习和生活交流以及项目中的合作！

特别感谢我的家人在学习和生活上给予我的关心和爱护。

戴 英 姿

2005 年 5 月

参考文献

- [1] 王炜等著,城市公共交通系统规划方法与管理技术,科学出版社,2002: 23-28
 - [2] 程秀生、陆化普、王晓明, Metrobus 城市公交系统及在库里蒂巴市的应用,中国第三产业, 2003, 2
 - [3] 陈艳艳, 美洲快速公交技术概论, 城市公共交通, 2002, 1
 - [4] 刘军民, 国外城市交通“公交优先”政策综述, 交通管理研究, 2001, 5
 - [5] 王克健、孟阳著, 日本城市交通管理, 上海远东出版社, 1997, 12
 - [6] 巴士快速交通在成都市的应用研究, 郑连勇、李钺, 交通运输工程与信息学报, 2004, 6:
 - [7] 莫露全、刘毅等编著, 城市公共交通运营管理, 机械出版社, 2004, 8: 10
 - [8] 杨晓光、林瑜、杭明升著, 信号控制交叉口公共汽车优先信号确定方法研究, 中国公路学报, 2001, 12: 101-105
 - [9] 徐康明, 快速公交系统——项可持续城市交通发展之路 (二), 交通与运输, 2003, 4: 11
 - [10] 徐康明, 发展快速公交系统是缓解中国城市交通拥堵的重要举措之一, http://www.brthchina.org/_private/BRT1.htm
 - [11] 闫晓勇、张天伟, 平面交叉口轻轨优先控制策略研究, 城市公共交通, 2004.2: 10-11
 - [12] 马荣国, 城市公共交通系统发展问题研究, 长安大学博士学位论文, 2003.5: 1-75
 - [13] 北京市市政设计研究总院, 北京南中轴大容量快速公交线路示范工程可行性研究, 北京: 北京市公共交通总公司, 2003
 - [14] 林卫, 现代公交专用道——昆明的实践、反思与展望, 城市规划, 2000
 - [15] 段里仁, 城市交通概论, 北京出版社, 1984: 331
 - [16] 徐家钰, 程家驹, 道路工程. 同济大学出版社, 1995: 25-40
 - [17] 陆建、王炜、陈学武, 公交专用车道设置条件与效益分析, 东南大学学报, 1998.5: 102-107
 - [18] 王炜、过秀成编著, 交通工程学, 东南大学出版社, 2000: 152-168
 - [19] 黄艳君, 城市公共交通路段优先通行技术及评价方法研究, 东南大学, 21-40
-

-
- [20]张南, 公交优先通行系统研究, 西南交大硕士论文, 2003: 14-19, 34-37
- [21]全永荣, 刘小明等著.路在何方——纵谈城市交通.中国城市出版社, 2002: 145-172
- [22] 江薇, 王伟, 陆建, 石飞, 许志才.城市公交专用道对话研究——苏州市致力于发展公交建设, 塑造合理交通方式结构. 交通标准化.2002, 4: 29-32
- [23] the Federal Transit Administration, TCRP Report 90 Bus Rapid Transit, Transportation Research Board of the National Academies: 39-40
- [24]任福田等译.道路通行能力手册. 美国交通研究委员会专题报告 209 号, 北京:中国建筑工业出版社, 1991. 323-324
- [25]Kittelson & Associates, Inc. Transit Capacity and Quality of Service Manual. Prepared for Transit Cooperative Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 1999: 2-34
- [26]张起森、张亚平编著, 道路通行能力分析, 人民交通出版社, 2002: 148-151
- [27]张卫华、陆化普等, 公交优先的信号交叉口配时优化方法, 交通运输工程学报, 2004: 49-53
- [28]杨晓光、林瑜等, 信号控制交叉口公共汽车优先信号确定方法研究, 中国公路学报, 2001: 101-108
- [29]陆化普, 城市交通现代化管理, 人民交通出版社, 1999
- [30]季彦婕、邓卫, 交叉口公交优先技术研究现状及发展综述, 交通运输系统工程与信息, 2004: 30-34
- [31]Herbert S.L.、Samuel Z.、Jennifer C. , Bus Rapid Transit : An Overview, Journal of Public Transportation, 2002: 16-22
- [32]Walter Kulyk P.E.、Matthew H., ITS Enhanced Bus Rapid Transit Systems. <http://www.gulliver.trb.org/conferences/VHA-BRT/>
- [33]Transportation cooperation research program90, Bus Rapid Transit Volume1: Case Studies in Bus Rapid Transit, Transit Research Board of The National Academy, 2003
- [34]United States General Accounting Office(GAO) Issues Report on BRT, Bus Rapid Transit Shows Promise, 2001: 17-31
- [35]Diaz R.B.、Schneck D.C., Bus rapid transit technologies in the Americas: An overview, Transportation Research Record, 2000: 3-9
-

-
- [36]Miller、Mark A. Etc, Bus rapid transit institutional issues: The route from research to experience, Transportation Research Record, 2001: 34-41
- [37]Kevin N.B.、Conrad L.D., Development and Evaluation of an Intelligent Bus Priority Concept. Transportation Research Board, 2000
- [38]Leal M.、Bertini R.L., Bus Rapid Transit: An Alternative for Developing Countries, Compendium of Technical Papers. Institute of Transportation Engineers 2003 Annual Meeting. Seattle, Washington, 2003
- [39]Peter K.、John R., Detection Range Setting Methodology for Signal Priority, Journal of Public Transportation, 2002: 116-117
- [40] Matthew Pahs、David Hampsten、Robert L. Bertini, Door-to-Door Mobility: Evaluating a Bus Rapid Transit Community Transport concept, Public Journal of Transportation, Volume 5, No.2, 2002
- [41]胡润州, 快速轨道交通系统与快速公交系统的经济分析研究, 184-190
- [42]马强, Bus Rapid Transit: 城市公共交通系统的新选择, 197-202
- [43]陈雪明, 对巴士快速交通的定位分析, 203-216
- [44]刘欣, 快速公交系统(BRT)在北京的应用前景, 217-223
- [45]翟忠民著, 道路交通组织优化, 人民交通出版社, 2004: 93-102
- [46]陈钦水, 城市地面快速公交网络系统规划研究, 西安建筑科技大学, 硕士论文, 2004: 23-31
- [47]陈爱萍, 快速公交规划的基本问题研究, 长安大学, 硕士论文, 2004: 36-45
- [48]Yuichiro Yoshida, Essays In Urban Transportation, Doctor paper of Boston Collge, 2001
- [49]BRT: 快速公交, <http://www.sss.net.cn/ReadNews.asp?NewsID>, 2005.3.14
- [50]环绕 VS 穿越 成都二环路改造方案近日可敲定, <http://www.scol.com.cn/>, 2004 年 5.18
- [51]北京快速公交, <http://www.brchina.org/BJBRT1.htm>
-

攻读硕士学位期间发表的论文

[1]戴英姿、马啸来, 配送中心选址方案的综合模糊评价, 兰州铁道学报, 2004.2: 93—96

[2]马啸来、戴英姿、王蓉, 物流源区信息网络安全研究, 交通与计算, 2004.1: 76—79。

附表

附表 1 二环路解放路路口机动车交通量调查记录表

进口方向：南入口

单位：辆

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
6:00~6:15	1	0	0	49	2	5	11	4	6
~6:30	4	1	1	47	5	5	25	2	4
~6:45	8	2	0	51	10	9	32	6	5
~7:00	3	1	1	50	9	8	25	5	8
~7:15	12	1	1	38	10	7	13	1	4
~7:30	13	0	0	69	12	9	23	4	7
~7:45	16	3	1	103	16	7	22	3	8
~8:00	13	1	1	103	11	7	32	5	8
~8:15	31	0	1	111	8	10	25	2	6
~8:30	43	5	1	89	10	3	25	6	4
~8:45	38	7	2	100	7	15	26	5	6
~9:00	47	7	2	104	11	9	25	2	6
~9:15	49	6	3	97	7	6	26	2	9
~9:30	45	4	1	103	10	5	26	9	5
~9:45	55	6	2	82	5	8	20	4	6
~10:00	61	1	1	98	5	6	39	4	6
~10:15	56	1	2	108	5	7	21	3	4
~10:30	43	2	2	79	4	8	36	4	9
~10:45	45	2	3	123	7	5	37	3	7
~11:00	31	2	1	83	10	5	28	5	7
~11:15	48	3	4	94	4	7	34	5	10
~11:30	47	1	1	94	12	7	44	3	7
~11:45	29	0	4	93	7	7	35	3	8
~12:00	46	0	3	91	9	4	27	2	10
~12:15	33	2	4	96	6	4	29	1	8

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
~12:30	35	0	1	70	7	7	19	1	4
~12:45	27	4	3	72	3	5	19	3	10
~13:00	36	1	1	71	7	6	21	2	6
~13:15	31	1	2	74	7	5	15	3	8
~13:30	27	3	3	85	12	15	12	1	11
~13:45	38	1	1	76	10	11	15	3	8
~14:00	48	0	1	91	4	15	15	3	7
~14:15	35	2	2	80	5	9	21	4	8
~14:30	39	2	4	88	6	9	22	3	9
~14:45	32	0	2	74	3	7	23	1	10
~15:00	36	2	4	98	8	7	13	1	7
~15:15	52	3	5	99	4	8	17	2	11
~15:30	37	6	3	89	13	7	38	5	11
~15:45	43	12	2	81	4	6	17	2	5
~16:00	39	3	2	96	8	7	18	4	7
~16:15	44	4	0	96	6	8	26	1	9
~16:30	39	1	3	89	7	9	24	2	12
~16:45	38	4	2	104	8	5	24	3	8
~17:00	42	3	0	93	8	10	25	6	11
~17:15	49	0	3	104	5	7	25	2	7
~17:30	53	4	1	96	6	9	28	4	10
~17:45	40	4	4	104	8	8	22	4	15
~18:00	62	3	3	110	2	7	24	4	20
~18:15	35	2	3	92	2	8	26	1	8
~18:30	66	2	3	88	2	8	29	4	12
~18:45	38	3	1	88	8	8	21	2	12
~19:00	26	3	7	76	3	7	32	3	10
~19:15	31	2	6	71	5	7	23	3	9
~19:30	24	1	1	61	2	4	18	3	6
~19:45	20	0	1	60	7	6	24	1	7
~20:00	16	0	1	47	4	8	15	2	7
合 计	1995	134	117	4778	386	416	1357	176	453

附表 2 二环路解放路路口机动车交通量调查记录表

进口方向：南入口

单位：辆

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
6:00~6:15	9	1	4	20	2	0	10	1	0
~6:30	6	0	2	24	2	5	7	3	0
~6:45	9	1	1	22	3	2	9	1	1
~7:00	8	0	1	18	5	1	9	3	0
~7:15	15	1	2	34	9	3	12	3	1
~7:30	14	1	3	58	9	4	18	4	0
~7:45	14	1	1	80	13	1	11	2	0
~8:00	29	3	1	69	17	2	23	7	3
~8:15	16	2	1	84	21	4	26	5	0
~8:30	18	3	1	96	10	8	31	6	0
~8:45	20	2	0	106	12	8	35	5	0
~9:00	26	1	1	99	8	7	53	3	0
~9:15	15	2	0	109	15	11	34	3	1
~9:30	28	1	0	104	13	7	33	4	0
~9:45	15	2	0	113	14	6	34	3	3
~10:00	26	1	1	111	14	5	30	3	0
~10:15	23	1	3	92	9	8	25	1	0
~10:30	22	1	2	106	10	8	36	1	0
~10:45	32	1	1	105	11	9	30	1	0
~11:00	21	1	2	115	6	6	27	2	0
~11:15	26	1	2	102	13	9	42	1	0
~11:30	21	0	2	130	16	3	27	0	0
~11:45	24	3	3	89	8	11	28	1	0
~12:00	14	1	1	87	8	6	38	3	1
~12:15	20	0	1	75	5	12	31	3	0
~12:30	20	1	3	64	5	10	33	3	2
~12:45	21	1	1	60	6	14	17	2	0
~13:00	13	0	1	74	6	9	23	4	0

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
~13:15	31	2	1	63	4	11	21	4	0
~13:30	18	0	2	46	5	9	24	3	0
~13:45	15	2	1	53	6	2	28	3	1
~14:00	21	1	2	63	6	8	35	1	0
~14:15	13	2	2	66	4	7	26	4	0
~14:30	15	5	2	63	9	8	22	1	0
~14:45	23	0	2	57	6	4	22	2	0
~15:00	21	0	1	66	8	8	22	2	0
~15:15	14	0	1	61	6	10	21	3	0
~15:30	27	1	1	64	5	8	37	2	0
~15:45	29	0	3	64	5	7	26	2	1
~16:00	28	2	2	59	8	8	28	0	0
~16:15	28	1	2	68	6	6	27	3	2
~16:30	17	2	3	61	5	3	32	3	0
~16:45	15	1	2	69	8	4	27	2	1
~17:00	28	1	2	78	5	12	28	1	0
~17:15	29	0	1	71	5	5	25	4	0
~17:30	21	1	2	81	5	12	14	1	0
~17:45	23	1	3	50	6	10	26	1	0
~18:00	19	0	0	41	8	6	26	3	0
~18:15	11	1	1	56	5	7	23	5	2
~18:30	13	0	2	42	11	7	27	1	0
~18:45	7	0	3	64	11	12	19	4	0
~19:00	17	2	2	67	10	8	21	0	0
~19:15	13	1	2	53	5	4	20	1	3
~19:30	11	1	1	38	6	4	16	0	0
~19:45	8	1	2	37	6	5	16	1	0
~20:00	6	1	1	41	5	4	15	0	0
合 计	1046	62	90	3888	449	378	1406	135	22

附表 3 二环路解放路路口机动车交通量调查记录表

进口方向：西入口

单位：辆

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
6:00~6:15	10	0	6	32	6	8	22	0	0
~6:30	18	1	8	41	4	9	14	0	0
~6:45	10	0	4	38	2	14	15	1	3
~7:00	18	5	6	37	9	16	9	3	3
~7:15	18	8	5	45	6	14	20	7	5
~7:30	33	4	9	64	12	12	17	3	4
~7:45	24	6	10	62	12	16	33	3	3
~8:00	35	2	5	83	5	10	25	1	4
~8:15	29	5	10	106	12	24	26	2	4
~8:30	44	2	15	102	6	15	28	1	5
~8:45	37	3	14	67	8	12	28	3	4
~9:00	34	8	13	85	6	16	21	1	4
~9:15	39	5	8	103	4	15	31	1	3
~9:30	32	2	5	88	4	12	22	2	5
~9:45	30	5	12	90	4	14	22	0	4
~10:00	35	1	6	83	5	10	17	2	5
~10:15	50	4	8	98	3	10	29	1	3
~10:30	29	5	8	90	6	12	36	1	6
~10:45	60	2	13	100	7	13	32	0	5
~11:00	55	2	10	90	2	13	34	1	4
~11:15	51	2	7	124	6	13	19	1	6
~11:30	54	5	6	114	3	11	35	0	4
~11:45	50	7	6	102	3	12	27	0	3
~12:00	73	8	10	101	4	9	17	0	3
~12:15	25	2	8	83	2	8	18	0	3
~12:30	30	10	13	83	6	12	20	1	3
~12:45	34	13	8	72	4	8	21	2	3
~13:00	27	6	8	72	9	12	18	0	4

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
~13:15	32	7	10	70	3	12	28	0	4
~13:30	18	2	7	73	2	15	23	0	5
~13:45	37	5	11	94	3	11	24	0	4
~14:00	40	5	10	81	5	12	33	1	5
~14:15	32	3	18	85	4	12	23	0	3
~14:30	34	3	9	96	8	13	27	0	4
~14:45	46	8	14	109	7	10	35	0	5
~15:00	29	5	8	102	6	15	38	0	7
~15:15	34	3	14	108	2	12	28	3	6
~15:30	38	0	9	109	9	10	28	2	5
~15:45	42	3	11	102	10	11	38	1	4
~16:00	39	5	9	103	2	11	31	2	5
~16:15	43	7	6	96	2	13	35	0	6
~16:30	36	4	7	73	4	12	29	1	4
~16:45	39	5	15	103	10	10	30	1	4
~17:00	38	5	9	93	7	9	35	0	4
~17:15	30	6	6	83	5	9	35	0	4
~17:30	17	8	5	80	3	13	37	1	4
~17:45	34	7	6	81	5	15	35	2	4
~18:00	30	7	3	83	5	11	30	1	3
~18:15	26	1	7	72	3	11	25	0	5
~18:30	39	4	6	100	1	10	38	0	3
~18:45	21	3	3	93	4	12	27	1	3
~19:00	15	5	5	89	3	14	28	4	4
~19:15	29	4	4	70	4	9	14	0	3
~19:30	21	4	8	91	4	12	26	1	3
~19:45	25	4	10	76	6	11	26	0	5
~20:00	17	2	5	69	4	9	29	1	3
合 计	1865	248	476	4739	291	674	1491	59	222

附表 4 二环路解放路路口机动车交通量调查记录表

进口方向：东入口

单位：辆

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
6:00~6:15				37	5	6	8	0	2
~6:30				24	2	10	13	0	0
~6:45				30	3	2	5	0	1
~7:00				36	4	4	2	2	0
~7:15				16	7	10	11	0	0
~7:30				41	4	12	9	1	0
~7:45				55	7	13	19	0	0
~8:00				58	5	15	39	1	1
~8:15	18	0	0	57	5	7	26	4	3
~8:30	22	2	0	43	5	7	39	7	2
~8:45	14	0	0	51	16	7	37	1	3
~9:00	21	0	0	67	19	3	37	5	1
~9:15	13	2	1	75	7	13	30	7	3
~9:30	17	1	0	113	6	14	35	3	3
~9:45	15	0	2	113	11	18	40	5	2
~10:00	21	1	0	96	8	17	43	3	1
~10:15	25	0	0	63	9	13	32	3	2
~10:30	16	0	0	86	12	12	37	3	1
~10:45	31	0	0	84	1	11	46	4	1
~11:00	24	0	0	75	6	8	41	3	1
~11:15	11	2	1	73	10	12	41	3	1
~11:30	22	0	0	64	3	12	35	1	1
~11:45	32	0	0	45	6	13	38	2	0
~12:00	19	0	0	55	3	11	29	3	1
~12:15	24	1	0	63	2	11	22	1	4
~12:30	20	0	0	60	9	10	20	3	3
~12:45	12	1	0	45	4	11	27	2	2
~13:00	9	0	0	68	4	13	17	2	1

	左转			直行			右转		
	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽	小汽	中型	公汽
~13:15	8	1	0	56	10	12	20	4	5
~13:30	10	2	1	51	15	7	25	4	2
~13:45	10	0	2	63	18	7	29	1	1
~14:00	26	0	1	48	17	8	24	2	2
~14:15	27	0	2	83	9	14	21	0	0
~14:30	20	0	1	73	4	10	27	5	0
~14:45	32	0	0	75	8	12	21	4	2
~15:00	18	0	0	63	3	7	20	1	0
~15:15	11	0	1	71	5	8	28	2	1
~15:30	24	0	0	80	9	13	26	2	1
~15:45	27	0	0	83	6	10	32	4	3
~16:00	19	0	0	59	2	7	29	4	1
~16:15	23	0	0	62	4	15	34	1	1
~16:30	19	1	0	71	4	14	25	1	1
~16:45	19	1	0	56	6	16	26	1	0
~17:00	18	1	0	65	6	14	27	0	2
~17:15	23	0	0	56	6	13	21	2	1
~17:30	12	0	0	55	5	7	21	3	1
~17:45	16	1	0	50	4	9	24	2	0
~18:00	12	1	1	60	4	17	28	0	2
~18:15	28	0	0	62	24	7	16	1	0
~18:30	22	0	0	65	17	10	31	3	1
~18:45	19	0	0	75	10	6	22	7	1
~19:00	15	1	0	59	15	7	11	3	2
~19:15	16	0	1	51	4	13	11	1	0
~19:30	7	0	1	62	3	10	15	1	2
~19:45	13	0	1	56	3	8	13	1	3
~20:00	11	1	0	31	1	9	22	3	3
合 计	891	20	16	3434	405	585	1427	132	78