

Bus Rapid transit (BRT) Parallel System Based on ACP Approach

X.-S. Dong^{1,2}, Gang Xiong^{2,1}, Dong Fan^{1,2}, F.-H. Zhu^{2,1} and Li Xie³

¹⁾ State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing, China (xisong.dong@ia.ac.cn, fanzixi@hotmail.com)

²⁾ Dongguan Research Institute of CASIA, Cloud Computing Industrial Technology Innovation and Incubation Center, Chinese Academy of Sciences, Dongguan, 523808, China (gang.xiong@ia.ac.cn, fenghua.zhu@ia.ac.cn)

³⁾ Zhejiang Provincial Key Lab of Information Network Technology, Department of information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China (xiehan@zju.edu.cn)

Abstract—Bus Rapid Transit (BRT) is an effective way to improve urban traffic status. But, because of its complexity, it is difficult in its operation management and scheduling. In this article, based on ACP approach, Parallel BRT System is constructed, which can detect real-time passenger flow at stations, traffic flow at stations and intersections and queuing length of vehicles on the road; to provide short-term passenger and traffic saturation prediction in order to timely arrange transportation management and relieve congestion; to assess, improve and optimize the emergency management of holidays, events, accidents and other emergencies; to improve the quality of real-time scheduling functions based on the measurement results detected from videos, and so on. This system has been applied in Guangzhou Zhongshan Avenue BRT, which was applied for BRT's monitoring, warning, forecasting, emergency management, real-time scheduling and other needs, to guarantee BRT's smooth, safety, efficiency and reliability.

Keywords—Bus Rapid Transit (BRT), ACP approach, parallel system, operation management, dynamically sensing, scheduling optimization

基于 ACP 方法的快速公交 (BRT) 平行系统

董西松^{1,2} 熊刚^{2,1} 范东^{1,2} 朱凤华^{2,1} 谢立³

¹⁾ 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京, 中国

²⁾ 中国科学院云计算产业技术创新与育成中心自动化所东莞研究院, 东莞, 广东, 中国

³⁾ 浙江大学信息与电子工程学系浙江省综合信息网技术重点实验室, 杭州, 浙江, 中国

摘要 快速公交 (BRT) 是当前解决城市交通问题的一种有效公共交通模式, 但因其复杂性, 难以建立精确实用的运营调度和管理模型。本文以 ACP 方法为指导, 结合广州 BRT 已有的交通视频检测分析和平行交通管理系统等成果, 研发 BRT 平行系统, 实现对站台乘客、站台车流、通道车流、路口车流和车辆排队长度的实时监控、报警; 提供短期客流及车流饱和度的预测功能, 以便 BRT 管理中心及时安排运力; 对节假日、大型活动、意外事故等突发事件的应急管理进行评估、改进和优化; 以视频检测结果实现 BRT 的实时调度功能等。该系统可满足广州 BRT 在监控、报警、预测、应急管理、实时调度等方面的需求, 为 BRT 的畅通、安全、高效和可靠提供有效保障。该系统已成功应用于广州中山大道 BRT 的日常管理中。

关键词 快速公交 (BRT), ACP 方法, 平行系统, 运营管理, 动态感知, 优化调度

1. 引言

随着城市经济的发展、人口的快速增长和机动车辆的广泛应用, 城市交通问题日趋严重, 主要表现在交通拥挤、空气污染、噪声、交通事故、能源短缺等问题。大力发展

国家自然科学基金项目 (61174172, 70890084, 60921061); 国家 863 项目 (2011AA110502); 浙江省科技计划项目 (2009C33085)

公共交通是解决城市交通问题的根本途径[1]。轨道交通具有运量大、快速、准时、安全等优点，但因其造价高昂、建设周期长和投资回收慢等缺点限制了其广泛应用。常规公交因先天规划不足和小汽车迅猛发展等的影响，运营效率低，服务水平差，在发展中受到了阻碍。快速公交(Bus Rapid Transit, BRT)运营特征接近轨道交通，成本远低于轨道交通，能够满足公共交通可持续发展的要求，是当前解决城市交通问题的一种有效公共交通模式，也是提高公共交通服务水平和运营效益的优选方式之一[2-5]。

BRT 是利用现代公交技术配合智能交通的运营管理，以改良型公交车辆运营在专用道上，保持轨道交通特性且具备普通公交灵活性的一种便利、快速的和具有高等级、高服务水平的公共交通方式，它整合了车辆、车站、车道、售票、智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)和运营组织服务等因素，形成具有强烈形象感和独特性的综合系统(见图1)。BRT最大的优势在于在提供与轨道交通相似的运量与运输速度情况下，仅需要占用少量地面道路，投资少、建设周期短、见效快、灵活性高、服务可靠、经济性好，在服务水平上的改进主要体现在运量大、快速、环保、舒适、可靠、安全、灵活等方面[1-9]。

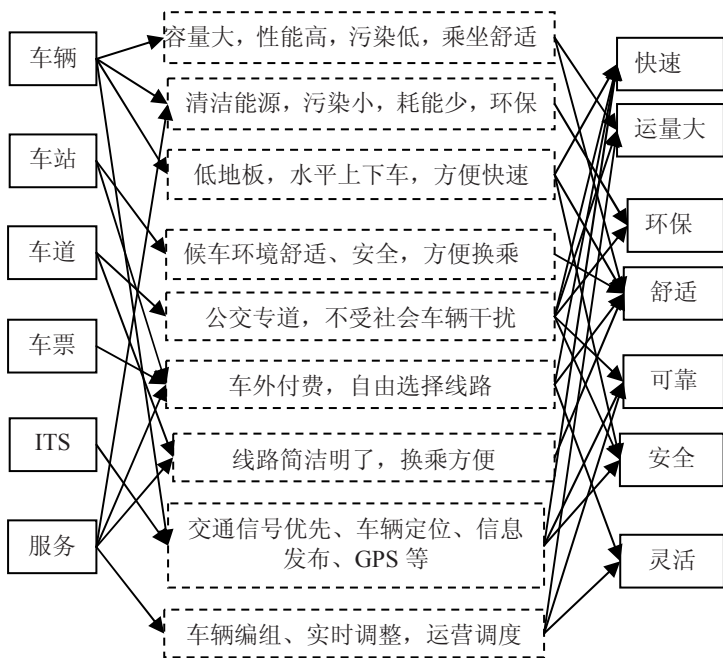


图1 BRT的组成部分及其典型特点

自1973年首条BRT于巴西库里蒂巴诞生后，就以其经济、灵活、快速、大运量等优势迅速在世界各地推广开来。联合国人居署、世界银行、国际能源机构以及国际公共交通联合会等国际组织，都将其作为解决城市公共交通

问题的革新性方案并积极向世界各大城市推荐[1-4]。目前，全球有一百多座城市修建了BRT。

但是，由于BRT本身的高度工程复杂性以及社会复杂性，因此难以建立精确实用的运营调度模型；现有的大多数调度和管理依然靠调度员凭借经验和人力执行，不能够自动实现，这严重制约了BRT运营管理效率和效益的进一步提高，也影响了其对普通公交以及地铁、轻轨等交通方式的竞争力[7]。所以，现有的研究手段及方法远远不能满足实际应用需求，需要新的理论和方法。

ACP方法为解决大复杂系统的建模、运营等问题提供了一条新的思路。本文以ACP方法为指导，结合广州BRT已有的交通视频检测分析和平行交通管理系统等成果，建立人工BRT系统，并与实际BRT系统尤其是其视频系统相结合，建设BRT平行系统。该系统可以满足广州市城市BRT在监控、报警、预测、应急管理、实时调度等方面的需求，为广州BRT的畅通、安全、高效和可靠提供有效保障。

2. 基于ACP方法的BRT平行系统

ACP方法，包括人工系统(Artificial Systems)、计算实验(Computational Experiments)和平行执行(Parallel Execution)三个部分，具体可以描述为：综合考虑工程、社会、人为和环境等因素，采用理论建模、经验建模和数据建模有机结合的方法，建立与实际系统“等价”的人工系统，解决实际系统难以进行传统建模的难题；在人工系统上通过计算实验或“试验”来认识实际系统各要素间正常和非正常状态下的演化规律和相互作用关系；通过二者的相互连接，对其行为进行对比和分析，研究对各自未来状况的“借鉴”和“预估”，相应地调节各自的控制与管理方式；最后利用计算实验所认识的规律实现平行执行：正常情况下，利用人工系统认识实际系统千变万化的演化规律，不断优化实际系统的控制目标和减少非正常情况的发生；非正常情况下，利用人工系统帮助找到让实际系统迅速恢复正常的应急控制方法，从而减少损失[10-11]。

目前，ACP方法体系基本成型，相关理论、技术正在丰富和完善中，ACP方法已经先后成功应用到乙烯生产、城市道路交通、城市公共交通等方面，并正在应用到农业、军事、物流、经济、安全、管理等领域[12-15]。

基于ACP方法，将人工交通系统与实际交通系统相结合构成平行交通系统。它可以用于：对正在运行的交通运营管理系统进行滚动式改进与优化；对实施的交通控制与管理措施通过计算实验进行评估；对交通系统管理者和用户进行“虚拟”培训，提高学习效率和操作可靠性；非正常情况下找到让实际系统迅速恢复正常的应急控制方法从

而减少损失；等等。

以 ACP 方法为指导，以广州 BRT 为研究对象，研究机理建模、数据建模和经验建模等有机融合的多模态建模方法，以原有的人工交通系统（TransWorld）为基础，结合广州 BRT 已有的交通视频检测分析和平行交通管理系统等成果，研发 BRT 平行系统（见图 2、图 3），满足广州市城市 BRT 在监控、报警、预测、应急管理、实时调度等方面的需求；并通过平行执行，实现 BRT 人车路协同优化。

BRT 平行系统，主要包括 BRT 动态感知系统、人工 BRT、BRT 综合评估系统、人工 BRT 的计算实验平台等几个部分。

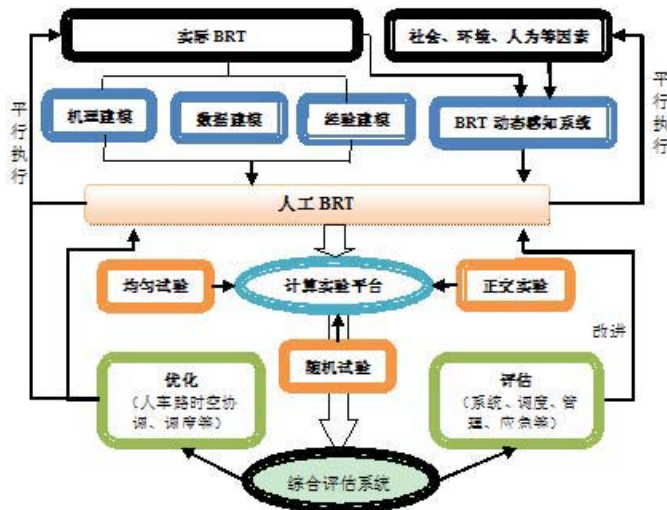


图 2 BRT 平行系统流程图

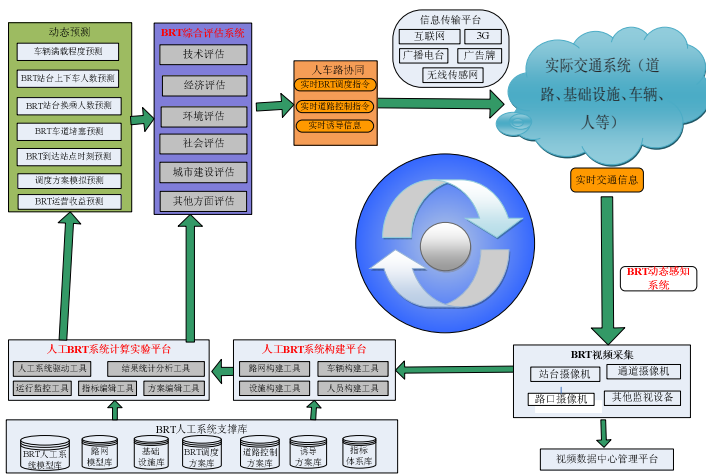


图 3 BRT 平行系统架构图

2.1 BRT 动态感知系统

BRT 动态感知系统是将 BRT 车内、BRT 车站和 BRT 专用道交叉路口的视频、车载 GPS 定位系统和 GIS 系统等整合到一起，实现实时传输，掌握客流的时空分布、实时

监测、实时调度、实时发布信息等功能，使 BRT 管理机构能够实时获得掌握 BRT 车辆运行状况、站台状况和车上状态，也可为领导的决策和调度中心的调度提供数据支持，实现 BRT 的安全、可靠、高效运行，达到 BRT 最大的政治、经济、社会、环境等效益。为了实现 BRT 优化调度，调度中心需要及时了解各公交车辆的位置、进出站时间、站台候车人员数量、公交车内乘员数量；道路信号控制系统也需要获取公交车的准确位置以及车内乘员数量等信息，以合理分配优先通过权限。这都需要 BRT 的动态信息。具体内容包括：

- (1) 基于 BRT 专用道摄像机的车辆信息检测：通过专用道上的摄像头，检测专用道车流量、高峰小时流量、饱和度和、拥堵程度、平均速度、排队长度、延误时间、交通事故检测和定位等，分析专用道的服务水平；
- (2) 基于 BRT 车站摄像机的客流检测：通过视频图像处理 and 智能分析，实时采集公交车站的人群数据，包括流量、密度、异常行为等，从而为公交调度提供必要的信息；
- (3) 基于 BRT 公交车载摄像机的乘客信息检测：通过视频检测与车辆定位、无线信息传输等技术相配合完成公交车的乘客上下车人数、上下车时间、相应站点等数据统计工作，真实地记录各时间、各区段的上下客情况；
- (4) 根据 BRT 车载、车站及路口摄像头视频数据分析，可得到乘客 OD 矩阵，对整个 BRT 的线路进行优化，如增加新的线路，削减、调整或合并乘客较少的线路等等；根据车站各个子站的摄像头视频的数据分析，对各个车站的各个子站的停靠线路就行调整，以使各子站乘客饱和度较为平均，使车站等车乘客和车辆从时间和空间上相匹配。

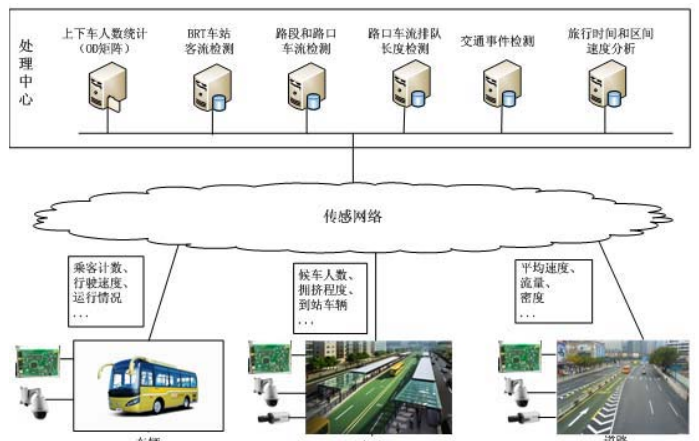


图 4 视频检测框架图

2.2 人工 BRT 系统

人工 BRT 系统，采用 ACP 方法，需要对 BRT 进行建模。BRT 主要包括人（乘客、司乘人员、管理者）、车（BRT 车辆、车流）、路（站台、路段、路口、线路、线网、专用通道）、环境（天气、其他交通配套设施及周边环境）、管理（车辆调度、人员排班、其他措施）、目标和结果（BRT 公司效益、社会效益、乘客满意度）等要素，涉及工程复杂性和社会复杂性两大领域。仅仅采用传统交通模型、专家知识模型、数学模型、或者基于实际 BRT 运营数据模型，都是不完整的，需要采用多种手段的多模态建模方法。

即，“车”和“路”等工程复杂性对象主要采用机理建模方式，“人”和“环境”等社会复杂性对象主要采用 Agent 建模，对于难以采用上述建模方法的对象，则可以通过智能交通系统采集到的 BRT 数据进行建模（蒙特卡洛模型）。对于复杂对象来讲，采用管理专家和技术专家在长期工作中积累的专家经验建立专家经验模型（神经网络模型）。

人工 BRT 的开发目标是在虚拟环境下“培育”和“生长”实际 BRT 的“替代”版本，为 BRT 的实验与评估提供统一一个开放且具有高可靠性的实验平台。人工 BRT 交通系统的数据基础是组成交通系统的四要素：人、车、路和环境，它们具有开放的数据和模型接口，可以接入已有的路网结构、人口分布等数据库。框架的核心是基于代理技术的个体建模，即将个体统一用具有一定独立性和智能性的代理来表示，代理具有独立的个体特征，其行为上的智能性和主动性主要体现在完成活动和出行的过程中。在个体建模的基础上，人工交通系统可以充分利用已有的交通仿真模型，通过大量出行者个体的交通行为，“涌现”生成复杂的交通现象。

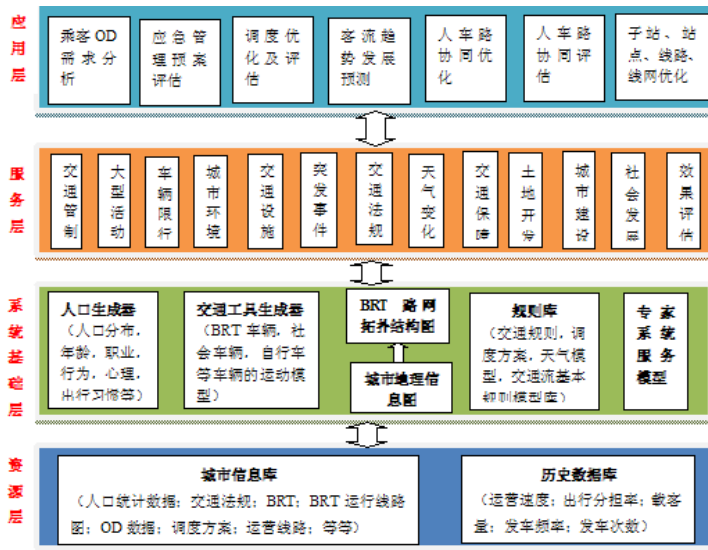


图 5 人工 BRT 系统层级体系结构图

系统采用中国科学院自动化研究所开发的人工交通系统（TransWorld）作为人工 BRT 系统的内核。系统提供人工交通系统设计平台，通过设计平台，对构成人工交通系统的各部分元素进行设置，从而构建出符合设计者需要的人工系统。

人工 BRT 主要包括基础信息模块、路网构建模块、交通工具生成模块、出行行为产生模块、路径规划模块、交通微观仿真模块等。BRT 平行运营管理系统的基础信息模块是其最基础部分。具体包括：

- (1) BRT 站台信息：包括名称、位置、子站数量、子站长度、上下行等；
- (2) BRT 通道信息：包括通道（2 个站台间）名称、位置、长度等；
- (3) BRT 路口信息：包括名称、位置、所在通道、信号灯设置等；
- (4) BRT 线路信息：包括名称、停靠站台、子站、车辆数等；
- (5) BRT 线路周边区域路网、交叉口、主要设施等等基础设施信息；
- (6) BRT 车辆信息：包括车辆编号、GPS 编号、所属线路、运行状况（是否运营、上行下行、运营方式（全程、段掉头、区间、快车等）、行驶位置、行驶速度等）等；
- (7) 相关人员（乘客、BRT 管理人员、区域人口、OD 矩阵等）信息；
- (8) BRT 管理中心信息：规章制度、调度方案、发车时刻表等。

2.3 BRT 综合评估系统

BRT 综合评估系统可以对实际 BRT 的运用效果和人工 BRT 的计算结果进行分析与评估，全面反映 BRT 运营主要方面的性能要求，其过程如下：

- (1) 建立多层次的评价指标体系（见表 1）；
- (2) 由层次分析法确认系统各层次指标的权重；
- (3) 由专家分析法对如乘客满意度、车辆状况等不易准确定量的定性指标进行量化处理；
- (4) 对各指标进行量纲转化；
- (5) 根据模糊综合评价法进行综合绩效评价。

2.4 人工 BRT 的计算实验平台

人工 BRT 的计算实验平台，即设计同时支持真实与虚拟实验场景的场景生成器。场景生成器能够接受最终用户输入的场景或自动提取场景库中的特定实验场景，实例化实验场景中的交互机制与管理规则，并传递给事件驱动引擎完成计算实验仿真；基于离散事件仿真技术实现事件驱动引擎，并动态模拟实验场景中各代理的交互与通信过程。

事件驱动引擎采用仿真时钟模拟实验平台运行时的特定时刻和时间变化,按时间顺序存储、分析和确定实验过程中离散事件及事件间的引发关系。通过仿真时钟的推进和离散事件的处理来驱动和模拟计算实验的过程,并将适用于计算实验平台的算法分析工具以模块和组件的形式应用于实验平台中,如各类群体策略学习与优化算法、定性与定量计算实验评估算法以及对各应用领域提供特定支持的专用算法模块。这些工具将动态地分析、评估和优化计算实验过程及其结果,并实时更新知识库。

表 1 BRT 评价指标体系表

评价主体	评价内容	评价指标
交通管理者、运营管理者、道路使用者、公共安全负责部门、政府部门、学术机构、规划部门、环保机构、驾驶者、乘客等	技术评价	发车频率
		乘客运量
		运行速度
	经济评价	新技术开发
		节省出行时间
		就业数的变化
	环境评价	温室气体排放量
		污染物排放量
		噪音水平
	社会评价	车票花费比例
		出行方式比例
		乘客满意度
	城市建设评价	TOD 开发
		商业活动
		房地产开发
	其他评价	大型活动保障
		应急管理与预案
		人车路协同

人工 BRT 的计算实验平台可以支持基于人工 BRT 的计算实验设计、执行、预测与分析,对 BRT 不同的客流、车流、路口控制策略、指标体系等进行配置,在人工 BRT 上得到不同的“场景”,形成正交实验、均匀实验或者随机实验的方案。通过对人工 BRT 设计不同的实验方案,执行大量的各种计算实验,可以较为全面、准确、量化地得到不同状态下各个交通影响因素对于交通质量的影响程度。主要包括:

- (1) BRT 公交线路实验及评价:模拟 BRT 公交线路的初步运营调度方案,并根据乘客平均候车时间、BRT 车辆载客率、BRT 车辆行程速度、BRT 车辆平均延误等指标进行运营调度方案评价;
- (2) 方案实验及优化建议:根据方案的指标分析,并与现状做相应对比,依据交通组织理论及运营调度理论,实验论证意见的合理性,并给出方案的优化建议;
- (3) 重要交叉口实验及分析评价:对于 BRT 系统所经过的重要交叉口的交通组织方案展开分析与评价;

- (4) 路段的实验及分析评价:对各个路段的饱和度分析,确定路段的服务水平,明确路网中存在的瓶颈路段;
- (5) 交通影响实验及评价:根据行程时间、区间速度、延误时间等指标,对于 BRT 系统建立后对社会车辆产生的交通影响进行分析与评价;
- (6) 方案指标实验及评价分析:通过对仿真得到的各项指标的分析,评价各种交通组织方案的效果;
- (7) 根据预测书籍进行实验分析:根据实时监测数据预测 BRT 在未来一段时间内的客流、车流变化情况,对可能的调度方案进行计算实验分析,以期得到最优的结果,为 BRT 的优化调度营运提供决策支持;
- (8) 其他:实验分析 BRT 专用道的公交车辆运行情况、BRT 站台的运行情况、乘客的行为、BRT 专用道影响下社会车道的车辆运行情况、各交叉口的交通组织情况和各种交通规则及规章制度、法规以及针对突发事件或大型活动等的应急管理预案等,得到不同公交组织方案下道路流量和速度、车辆平均行程时间、公交站点的平均排队长度、公交车辆的承载率、乘客平均等待时间、事故率、BRT 站台的最大乘客数以及对经济的制约、环境的破坏、资源的消耗、人口的冲击等。

2.5 实验和效果分析

将实际 BRT 系统、BRT 动态感知系统、人工 BRT 系统、BRT 综合评估系统和人工 BRT 计算实验平台结合到一起就构成了 BRT 平行系统。该系统可以实现“虚实互动、主动管理、滚动优化”的 BRT 人车路协同优化。同时,该系统可实现 BRT 车站和车内人流数据的实时检测、车流和路况数据的实时检测、报警等功能;根据实时监测数据预测 BRT 未来一段时间内的客流、车流变化情况,为 BRT 的优化调度营运提供决策支持(图 6);图 7 显示了广州 BRT 的 B1 路车在系统实施前后的发车频率的比较,从中可以看出系统实施后,总的发车次数从 144 次减少到了 133 次,加大了早晚高峰期的发车密度,适当减少了非高峰期的发车密度,从而在对乘客影响较少的情况下降低了公交公司的运营成本。

3 结论

本文以 ACP 方法为指导,结合广州 BRT 已有的交通视频检测分析和平行交通管理系统等成果,建设 BRT 平行系统,主要包括人工 BRT 系统、BRT 动态感知系统、BRT 综合评估系统、人工 BRT 的计算试验平台。该系统可实现对站台乘客、站台车流、通道车流、路口车流和排队车辆长度的实时监控、报警;提供短期客流及车流饱和度的预

测功能，以便 BRT 管理中心及时安排运力、舒缓拥堵；对节假日、大型活动、意外事故等突发事件的应急管理进行评估、改进和优化；以视频检测结果实现 BRT 的实时调度功能等。该系统可满足广州 BRT 在监控、报警、预测、应急管理、实时调度等方面的需求，提高 BRT 的人、车、通道、路口、站之间的协调，为广州 BRT 的畅通、安全、高效和可靠提供有效保障。

该系统实现了 BRT 管理从凭借经验制订和人力执行，到科学化制定、智能化系统执行，提升广州 BRT 服务和管理水平。

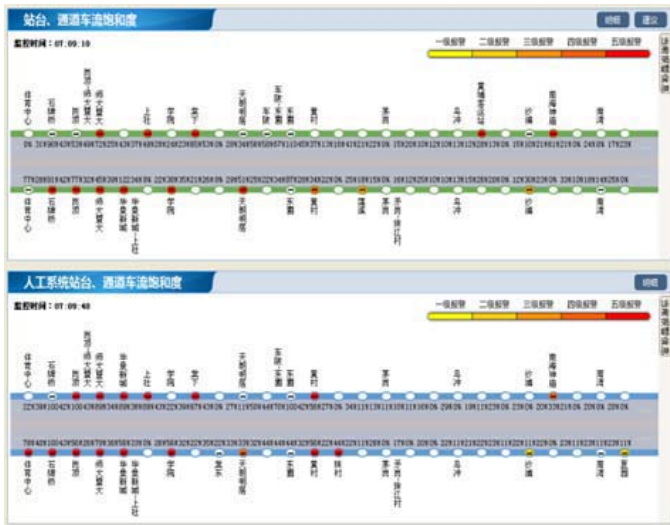


图 6 BRT 站台、通道车辆饱和度的实际检测及预测结果



图 7 系统实施前后 B1 路车的发车频率比较图

致谢

感谢自动化所王飞跃教授以及广州交通委员会张致处长对本文的指导；感谢中国科学院和广州市“数字亚运”合作项目《广州市亚运会公共交通管理辅助决策系统》(GZIT2010-DY0024)对本课题的资金支持。

参考文献

[1] L. Wright, W. Hook, *Bus Rapid Transit (BRT) Planning Guide*, Institute for Transportation and Development Policy, 2007.
 [2] America Federal Transit Administration. *Bus Rapid Transit*

Offers Communities a Flexible Mass Transit Option. 2003.

[3] P. K. Mzee, C. Yan, “Implementation of Bus Rapid Transit System as an Alternative for Public Transportation in Developing Countries Case of Dart System in Dar Es Salaam,” *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 2: 489–493, 2010.
 [4] Y. Pan, Z. L. Cai, “Research on setting conditions of Bus Rapid Transit (BRT) in Medium-sized cities,” *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, pp.3453–3457, 2011.
 [5] D. He, G. Q. Yan, Y. Ma, “Study of Bus Rapid Transit System Evaluation Based on Gray Extension Matter-element Model,” *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 1, pp. 1125–1128, 2011.
 [6] Y. Zhu, “Study on Intelligent Traffic Control Based BRT,” *2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, pp. 1–4, 2010.
 [7] X. S. Dong, G. Xiong, D. Fan, F. H. Zhu, Y. S. Lv Research on Bus Rapid Transit (BRT) and its Real-Time Scheduling, *2011 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, pp.342–346, 2011.
 [8] 孙传娇, *快速公交调度优化研究*, 长安大学博士论文, 2008.
 [9] 张守军, *城市 BRT 系统规划理论与方法研究*, 北京交通大学博士论文, 2007.
 [10] F. Y. Wang, “Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 65–67, 2007.
 [11] 王飞跃, 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论, *复杂系统与复杂性科学*, 第 1 卷第 4 期, 页码: 25–35, 2004.
 [12] F. Y. Wang, “Parallel control and management for intelligent transportation system: concepts, architectures and application.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 630–638, 2010.
 [13] G. Xiong, K. F. Wang, F. H. Zhu, et al. “Parallel traffic management for 2010 Asian Games.” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 24, no. 5, pp. 81–85, 2010.
 [14] Q. H. Miao, F. H. Zhu, Y. S. Lv, et al. “A Game-Engine-Based Platform for Modeling and Computing Artificial Transportation Systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 343–353, 2011.
 [15] L. F. Li, H. Zhang, X. F. Wang, et al. “Urban Transit Coordination Using an Artificial Transportation System,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no.2, pp. 374 - 383, 2011.