

## 基于 ACP 方法的城市平行停车系统

杨柳青<sup>1,2,3</sup> 王飞跃<sup>1,2</sup> 张艳丽<sup>1</sup> 韩双双<sup>1,2</sup> 杨坚<sup>1,2</sup> 赵恺<sup>1,2</sup> 程翔<sup>1,2</sup>

**摘要** 为解决当前城市停车愈加困难的问题,提出了基于 ACP 方法的城市平行停车系统,包括构建人工停车系统;通过计算实验对平行停车系统的管理与控制提供决策方案;以及利用平行执行的方式完成人工停车系统与实际停车系统滚动优化等 3 个主要过程。该平行停车系统的建立,不仅可以使得用户停车过程更加方便、停车资源配置更加有效,也为停车场新建过程提供了最佳的实施方案,最终彻底解决城市停车难题。

**关键词** 平行停车, ACP 方法, 人工系统, 计算实验, 平行执行

**引用格式** 杨柳青, 王飞跃, 张艳丽, 韩双双, 杨坚, 赵恺, 程翔. 基于 ACP 方法的城市平行停车系统 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(4): 384–390

**ID** JCC.CN.2015.00384

### The Urban Parallel Parking System Based on ACP Approach

YANG Liu-Qing<sup>1,2,3</sup> WANG Fei-Yue<sup>1,2</sup> ZHANG Yan-Li<sup>1</sup> HAN Shuang-Shuang<sup>1,2</sup> YANG Jian<sup>1,2</sup> ZHAO Kai<sup>1,2</sup>  
CHENG Xiang<sup>1,2</sup>

**Abstract** To address the difficulties for current parking systems, this paper presents a novel urban parallel parking system based on the ACP method. This system is consisted of three main steps: the construction of the artificial parking system, the computational experiments to provide a decision method for the management and control of the parallel parking system, and the parallel execution between the artificial parking system and the actual parking system to achieve the rolling optimization for the management and control of parking systems. The proposed parallel parking system can not only bring the more convenient parking process and the more effective parking resource allocation, but also provide the optimum implementation scheme for the parking lots. Finally the urban parking problem could be solved effectively for different parking needs.

**Key words** parallel parking, ACP approach, artificial system, computational experiments, parallel execution

**Citation** Yang Liu-Qing, Wang Fei-Yue, Zhang Yan-Li, Han Shuang-Shuang, Yang Jian, Zhao Kai, Cheng Xiang. The urban parallel parking system based on ACP approach [J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(4): 384–390

近年来,随着社会经济的发展及人民生活水平的提高,汽车保有量呈逐年上升的趋势,根据国家统计局 2014 年年末统计结果显示<sup>[1]</sup>,国民民用汽车保有量达到 15 447 万辆, (包括三轮汽车和低速货车 972 万辆),比上年末增长 12.4%,其中私人汽车保有量 12 584 万辆,增长 15.5%。而汽车保有数量的急剧增长所带来的是城市停车相关基础设施的数量和停车管理方案高效性相对不足与落后,“停车难”

逐渐成为各大城市的通病,严重影响了城市居民日常生活质量、交通的运输速度及生产效率的提高。因此,如何通过停车资源的合理建设规划与调配,彻底攻克停车困难问题,成为城市建设中急需解决的重要民生问题。

综合分析造成停车困难的原因,主要有以下 3 个方面,首先是停车泊位绝对数量的不足问题;其次是停车场内泊位规划不够合理,管理不够规范,利用效率不高;最重要的是由于停车资源的管理使用缺乏智能化的整体解决方案<sup>[2]</sup>,即在已有的基础设施和管理制度下,缺乏有效、智能的技术手段对整个城市的停车资源进行有效的整合和管理。许多停车的不便来自于信息的不对称或缺乏科学的调度、智能的辅助、高效的整合等。

就目前国内外城市的停车场建设现状来看,对比国际上对于停车泊位与机动车数量“1.2:1”的要求,我国多数城市的车位缺口近三分之二<sup>[3]</sup>。在城市地面资源有限的前提下,采取建设地上、地下停车场

收稿日期 2015-11-17  
Manuscript received November 17, 2015  
国家自然科学基金 (61172105, 61501461, 61571020) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61172105, 61501461, 61571020)

1. 青岛智能产业技术研究院 山东 青岛 266109 2. 中科院复杂系统与智能科学重点实验室 北京 100080 3. 科罗拉多州立大学电子与计算机工程系 柯林斯堡 CO 美国 80523

1. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao Shandong 100190, China 2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China 3. The Department of Electrical and Computer Engineering, Colorado State University, Fort Collins CO 80523, USA

或立体车库等一系列方法,对解决停车困难可以起到一定的缓解作用,但短期内建设大量停车场成本投资大,回报周期长等问题,决定了增加停车位这一方案并非一时之功,所以需要努力探索得到能够挖掘出现有停车资源潜力的实施方案。

另外,为提高停车场空间的利用率,可以通过对车位形状布局的合理规划来增加单个停车场的车位数量。其次,利用价格杠杆不仅可以引导车辆在多个停车场之间的均衡分布,还可以提高车位的使用流通率。然而,这一切的手段与方法依然无法解决医院、节假日景点、大型会议及音乐会等特定时段,特定场合附近,停车泊位难找,或因为对陌生地段停车环境的不熟悉而遭遇的停车困难问题。针对上述各类情况,技术手段辅助停车可以通过获取及发布停车相关数据信息,对停车资源进行有效的调配,因而成为目前解决停车难题的重点研究方向。

## 1 现有智能停车方案分析

现有智能停车系统通常由管理控制电脑、车位检测系统、入口道闸、刷卡计时计费缴费系统及必要的指示标志等组成一个专属某个停车场内的信息化管理与控制系统。同时随着物联网、大数据、云计算等技术的发展,融合智能交通、移动互联网云技术、物联网及电子支付一体的智能停车场综合管理系统,成为智能化解决停车难题的趋势。此类系统可以打破停车场之间独立管理而造成的信息闭塞的现状,并在实现信息共享的基础上,使车主的停车过程变得更加方便智能。总结目前智能停车系统,其主要构成可以分为以下4个模块<sup>[4-9]</sup>:

1) 信息采集模块。该模块主要负责采集停车场的位置信息,停车场内的车位信息和出入停车场的车辆信息。停车场位置可以利用GPS技术获取到,车位信息的采集可以使用红外探测器、超声波、地磁等传感器技术,出入停车场的车辆信息的采集可以使用射频识别(RFID)技术,视频监控技术,车牌图像识别技术等。

2) 信息传输模块。该模块主要负责将底层模块采集到的信息通过有线或无线方式传输到信息分析与处理模块,包括无线传感器网络,ZigBee网络,互联网等。

3) 信息分析与处理模块。该模块主要负责对数据进行存储、分析、挖掘、提取,并将得到最新车位及出入库车辆数等信息提供给信息发布模块。

4) 信息发布模块。该模块主要负责将信息分析与处理模块的信息通过多种方式进行对外发布,引导用户停车,包括路侧的电子显示屏,手机短信服务,车载终端,广播电视,手机应用软件等。

目前此类智能停车系统更趋向于采用App作为停车服务的入口,涵盖了停车场、剩余停车位快速查找、导航、车位预订、车位出租、停车场内找车、手机支付停车费等功能,从一定程度上解决了部分地区的停车难题。现有的停车App可以分为两类,一类是硬件类,一类是软件类。硬件类主要是通过对接甚至自己研制硬件来提供高价值的服务,比如发布状态、预约、包月、无卡支付。由于替换所有车场的设备不现实、成本高、复制难,用户很难长期使用此类App。软件类,是暂时不做道闸硬件对接,通过外部手段塑造吸引用户的场景。这类软件信息来源可以由用户提供,或空车位播报,但数据的准确度和全面性无从保证。所以多款停车App从实际情况来看还无法更好地服务客户,真正解决停车困难问题。

通过对现有智能停车系统方案的分析总结可以发现,除了上述4个模块中的技术缺陷或不足之外,系统整体功能的实时性、有效性、准确性、全面性、协调性等方面也存在诸多的不足。首先,采用智能手段解决停车困难的传统方法多以仿真软件为工具,针对预先设定的离线场景进行组织优化方案设计(如停车场的规划设计),所形成的方案一般为预案形式,虽然这类方法能够在一定程度上改善整个停车系统的效率,但由于其粒度较粗,实际系统与仿真过程之间的滚动优化过程较少,因而其灵活性和鲁棒性较低。另外,停车过程涉及很多社会因素,驾驶员本身的行为习惯因素,大型活动,停车系统舆论评价等,而这类因素具有较高的随机性,因此,一个有效的智能停车系统不仅依赖于高新技术水平的提高,还必须要综合考虑这类社会因素,而这方面一般的智能停车系统因模型精度不够,事件处理不够灵活,容易给不熟悉系统操作流程的用户造成另一种停车困扰,比如因为使用了智能停车系统的停车资源,但没有进行预约,而造成较高额的罚款,从而造成用户对相应智能停车系统的抵触心理。因此,无论是在常态还是在突发情况下,如何对停车场的车位资源优化分配,提升整体资源利用率,以及对整个系统进行全面准确的评估和有效维护,指导车辆高效停车,缓解城市交通问题,是采用智能方案解决停车困难所需解决的主要问题。

通过进一步深入研究发现,停车系统作为一个典型的复杂巨系统,满足利用ACP方法<sup>[1-3]</sup>解决复杂系统问题的两个基本假设,即相对于任何有限资源,在本质上,一个复杂系统的整体行为不能通过独立分析其各部分的行为来确定,亦不能预先在大尺度(例如长时间或大空间)上确定。因此,本文基于ACP方法提出了平行停车系统的概念,所谓平行

停车系统是一种以停车复杂系统的管理和控制<sup>[1]</sup>为研究目标,利用先进计算手段,将实际系统与人工系统相结合,通过实际系统信息感知输入优化人工系统,并借助人工系统对复杂实际系统的行为进行“实验”,进而对其行为进行分析,得出针对实际停车系统管理和控制的滚动式优化执行方案,具有可实现智能化停车诱导、科学化停车资源建设、自动化停车资源管理、整体化提高停车系统运行效率等功能的复杂系统。

## 2 理论体系

### 2.1 ACP方法

自2004年起,研究者们提出开展社会计算的研究工作重点围绕开源信息开展的天盾计划,主要包括天网、天眼、天鹰3个工程,并构建相应的平行系统,目标是为国家反恐和社会稳定提供决策支持<sup>[10]</sup>。同时,能够将平行系统理论应用于交通、物流、生态、家具等领域也具有非常重要的意义。

所谓ACP方法,即平行系统理论的具体应用方法,是指人工社会(Artificial societies)、计算实验(Computational experiments)、平行执行(Parallel execution)之间的有机结合<sup>[10-12]</sup>。人工社会或者人工系统可以理解为传统的数学或解析建模之扩展,计算实验<sup>[13]</sup>是仿真模拟的升华,而平行执行就是自适应控制(包括内模控制、预测控制、自适应动态规划ADP等<sup>[14]</sup>)的进一步推广<sup>[10]</sup>。

ACP方法的理念就是通过人工社会(Artificial societies)、计算实验(Computational experiments)、平行执行(Parallel execution)之间组合,将人工的虚拟空间Cyberspace变成我们解决复杂问题的新的另一半空间,同自然的物理空间一起构成求解“复杂系统方程”之完整的“复杂空间”。而新兴的“互联网”、“云计算”、“物联网”等技术,正是支撑ACP方法的核心技术。从本质上讲,ACP的核心就是把复杂系统“虚”的和“软”的部分建立起来,通过可定量、可实施的计算化,实时化,使之“硬化”,真正地用于解决实际的复杂问题<sup>[10]</sup>。

利用ACP方法解决实际的复杂问题可以分3步进行:第1步,利用人工社会或人工系统对复杂系统进行建模;第2步,利用计算实验对复杂系统进行行为的分析和其可能后果的评估;第3步,将实际社会与人工社会并举,通过实际与人工之间的虚实互动,以平行执行的方式对复杂系统进行有效的控制与管理<sup>[10]</sup>。

### 2.2 平行系统

平行系统是指由某一个自然的现实系统和对

应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统<sup>[13-14]</sup>。针对复杂系统特殊性,将仿真系统<sup>[15-16]</sup>进一步提高到人工系统<sup>[17]</sup>的高度,构造其实际系统与人工系统并行互动的平行系统,是平行控制的核心思想,目标是使实际系统趋向于人工系统,而非人工系统逼近实际系统,进而借助人工系统使问题简单化,以此实现复杂系统的控制与管理<sup>[18-24]</sup>。

图1为平行系统的基本框架,主要包括实际系统和人工系统,通过二者的相互作用,完成3种主要的工作模式,即学习与培训、实验与评估及管理与控制<sup>[15]</sup>。

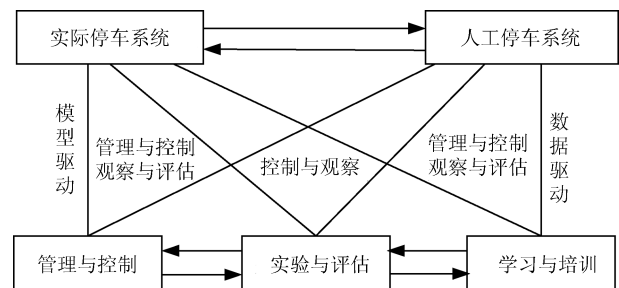


图1 平行系统运行的基本框架与模式

1) 学习与培训:在这一过程中,“人工系统主要是作为一个学习和培训管理及控制复杂系统的中心.通过将实际与人工系统的适当连接组合,可以使管理和控制实际复杂系统的有关人员迅速地掌握系统的各种状况以及对应的行动.在条件允许的情况下,应以与实际相当的管理与控制系统来运行人工系统,以期获得更佳的真实效果.同时,人工系统的管理与控制系统也可以作为实际系统的备用系统,增加其运行的可靠性和应变能力。”

2) 实验和评估:在这一过程中,“人工系统主要用来进行计算实验,分析了解各种不同系统的行为和反应,并对不同解决方案的效果进行评估,作为选择、支持管理与控制决策的依据。”

3) 管理与控制:在这一过程中,“人工系统试图尽可能地模拟实际系统,对其行为进行预估,从而为寻找对实际系统有效的解决方案或对当前方案进行改进提供依据.进一步,通过观察实际系统与人工系统评估的状态之间的不同,产生误差反馈信号,对人工系统的评估方式或参数进行修正,减少差别,并开始分析新一轮的优化和评估。”

应当指出的是,第1个过程类似于目前工程上的系统仿真软件的应用情况,但在实验方面迈进了一大步;第2个过程已在城市交通系统中得到应用,目前世界上一些城市交通管理已利用与实际交通管理与控制中心几乎相同的设施控制大规模的交通仿

真软件, 而且这些交通仿真系统部分采用了实时的实际现场交通数据. 第 3 个过程十分类似于基于滚动时段 (Rolling horizon) 和仿真的优化方法, 以及“实际系统在回路的仿真”的思想.

### 3 平行停车系统

#### 3.1 平行停车系统框架

平行停车系统主要由 3 部分组成: 人工停车系统, 计算实验和平行执行.

如图 2 所示, 构建平行停车系统的第 1 步是对实际停车系统中的停车相关信息进行全面、准确的采集. 停车相关信息采集子系统主要包括路况信息采集系统, 停车相关法规政策数据获取系统, 停车场属性 (包括盈利/非盈利、位置、规模、营业时间、收费标准等) 采集系统, 驾驶员属性与习惯 (性别、驾龄长短、停车位置偏好、停车场收费接收能力等) 数据采集系统, 车辆特征及停车场中泊位信息采集系统 (具体来说, 车辆特征可通过图像检测装置采集多帧的图像来提取车牌号码信息, 停车场中泊位信息采集模块可以利用现有的红外反射传感技术, 超声波检测定位技术, 地磁感应技术, 或者采用本文中研究推荐使用的基于 RFID 停车空位感知技术). 上述

系统的数据最终需要通过有线或无线的方式上传到云端服务器, 为人工停车系统的进一步建立提供充足的参考数据, 而本文研究使用的 RFID 阅读采集数据配合双选信道下的高速通信技术, 能够使上传过程更为快速.

第 2 步, 以云计算、并行计算、数据驱动等为人工停车系统构建技术支撑, 在此前提下, 以代理技术为核心构建行为特征随机性强、个体数量多的车辆及驾驶员模型, 同时构建承载并作用于上述主体的道路模型、停车场模型、设施模型、事件模型等. 在微观精细化学习性建模的基础上, 涌现 (所谓涌现方法本质上是一个实验、观察和描述性的方法<sup>[19]</sup>) 宏观现象, 并通过与实际停车系统的对比交互, 不断培育和优化人工停车系统, 进而使人工系统与实际系统实现“等价”. 以驾驶人员模型为例, 通过对人员的停车行为习惯进行分析, 通过不断地观察、学习、修正误差, 最终使得人工系统的人员模型达到与实际系统中人员一样具有自主分析决策和处理停车事件的能力. 除模型代理构建过程所需的其他各类数据库, 还需要对第 1 步中所有信息采集子系统所获取的信息建立对应的数据库. 以代理模型和相关数据库为基础的人工系统可以为下一步计算实验提供实验素材及实验环境.

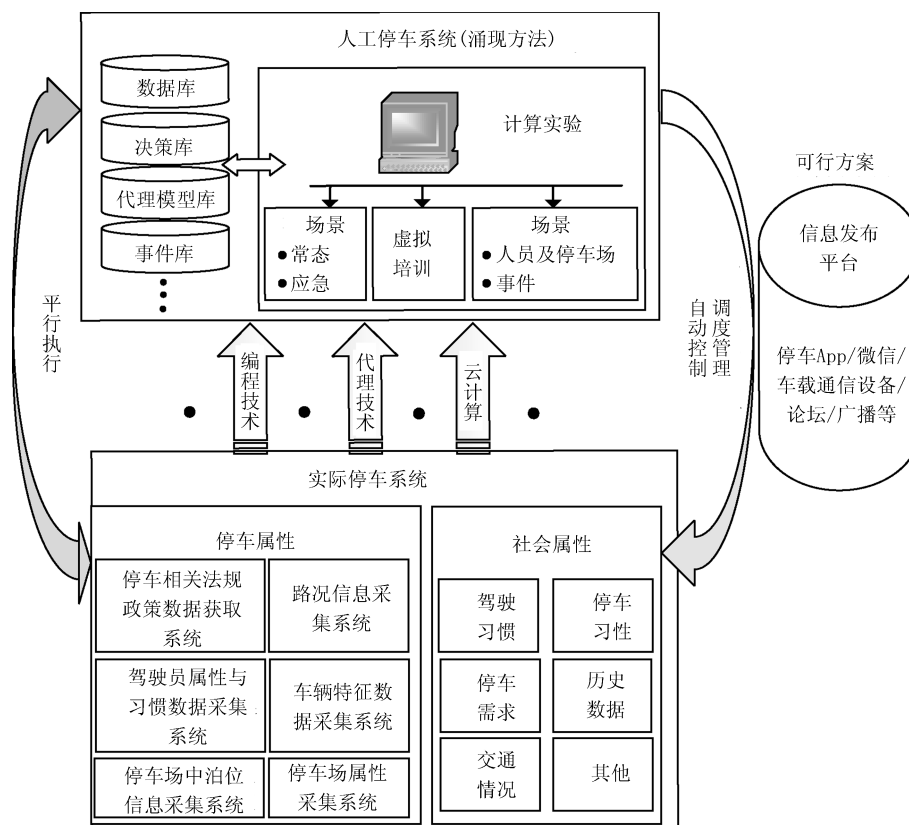


图 2 基于 ACP 方法的平行停车系统运行模式

第3步,采用云计算、大数据等手段,对所有的代理模型、数据库进行实验与评估,分析了解停车系统中行为和反应,并对不同解决方案的效果进行评估,作为选择和支持管理与控制决策的依据.其次在人工停车系统上,进行在线或者离线的计算实验,对具体的停车场建设,停车场管理与调配问题,用户的应急/临时停车方案,停车诱导信息发布等进行全面、准确及时地评估,验证在不同环境、不同指标下系统所能达到的实际效果.同时,计算实验与人工系统相结合,还能够对现有方案技术进行及时优化和更新,对新问题进行模拟、实验,并针对这些问题提出相应的设计方案和解决方法,使系统不仅解决现有问题的能力越来越强,而且对未来也具有很强的抗风险性.此外,在人工系统上,还可以对停车场管理人员、维护人员等进行“虚拟”培训,提高学习效率和操作可靠性.

第4步,在人工系统与实际系统的平行执行过程中,依据计算实验统计分析的结果,为有停车需求用户、停车资源管理者及停车资源建设方提供相应的决策信息,信息发布方式可以是现有的微信公众号、车载通信设备、广播等,但最方便的是利用本文中配套使用的手机 App 或 Web 平台.至此,本文所述的基于 ACP 方法的平行停车系统初步搭建完毕.

### 3.2 平行停车系统的具体应用

与其他智能停车系统相比,平行停车系统中的人工系统是“等价”甚至可以认为是凌驾于实际停车系统的一种系统.人工停车系统为实际停车系统提供的指导性服务主要有两个方面,即停车用户服务和停车资源管理及规划服务.

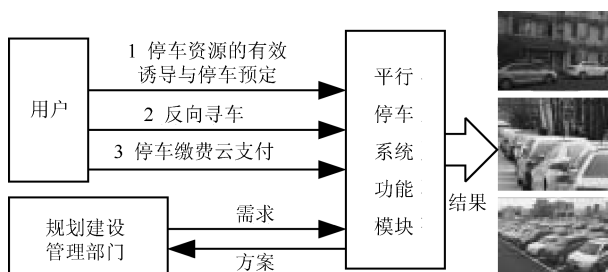


图3 基于平行系统的智能停车应用

#### 3.2.1 停车用户服务方案

从驾驶员角度出发,通过对用户建模,采集分析驾驶员的个人属性、停车习性<sup>[25]</sup>等个性化信息,分析停车资源、路面信息及其他社会因素等,可以给停车用户提供包括提供停车场信息、车位预约、停车路线诱导、反向寻车、停车缴费云支付等方面的服务或信息.这类信息或服务与其他智能停车方案相

比,效率更高,而且更贴近用户个人特点.

停车诱导与停车位预定:当用户出现停车需求时,可以通过手机 App 或 Web 平台实时查看停车场及相应停车位的信息,该信息是依托于计算实验及采用基于平行系统思想指导的分级推荐算法得到的结果,因此,用户所获得的停车场及停车位信息更加人性化,更加符合用户的个人停车行为习惯,而且用户可以根据提供的信息自主的选择车位.用户在选择好车位后可以通过在线平台对倾向的车位进行预订,此时人工停车系统中会同步显示车位被预订的结果,防止了多辆车同时开往同一个车位,出现冲突的局面.预订完成后,系统将会把最佳合适的路线诱导方案提供给用户,使停车过程更加方便.当然,停车信息发布及获取平台还包括广播、微信等多种方式,为避免多种停车信息获取渠道不同而带来的冲突,系统也会有相应的实验计算及解决方案.

用户的反向寻车:在车位规模较大的室内停车场,由于停车场环境和车位构造相似,使得用户所停车位与其他车位之间的区分度不大,继而造成在停车场进行反向寻车时有一定的困难.如何在短时间内有效获取停车位置并寻找到对应车位是一个重要的课题.

利用协同式检测与定位技术的车辆精确定位特性和移动终端使用的广泛性,本文从两方面来对反向寻车技术和产品进行研究和设计.

一方面,可以在停车场配置刷卡定位终端,利用电子标签卡(长期电子标签卡和临时进场发放的电子标签卡)与车牌号的一一对应,在车辆完成停车后,通过多个 RFID 阅读器利用协同式检测与定位技术精准定位车辆所在位置和停泊车位,在该过程中车主无需专门刷卡解决由于车主停车后忘记刷卡无法使用反向寻车技术问题.在反向寻车时,再次通过 RFID 在反向寻车终端上刷卡来读取停车位置,并在反向寻车终端上显示寻车路径,同时反向寻车终端还可以作为 RFID 标签电子支付的载体.

另一方面,可以使用本文中的配套移动终端 App,通过扫描二维码/条形码的方式来对停车的位置进行标记,最终由人工停车系统提供的信息或决策在 App 应用上以友好、高效形式展示车位的位置和寻车路径.同时,针对一部分用户群不习惯或不方便使用移动终端进行寻车,开发可以应用于停车场内的寻车终端,通过取纸质二维码/条形码来标记停车位,继而在寻车时通过在另一终端扫描所取的二维码/条形码来标记出发位置,并在寻车终端上友好地展示寻车路径.该方法尤其适用于地下停车场 GPS 信号效果不佳的情景.

另外,针对在每个车位配置摄像头进行车牌号

识别的停车场, 还可以通过在移动终端 App 或反向寻车终端中直接输入车牌号来进行停车位置的锁定, 再利用扫描附近位置的二维码/条形码的方法辅助人工停车系统生成相应的寻车方案。

**停车缴费云支付:** 对于收费型停车场, 基于 ACP 方法的平行停车系统的支付平台中, 由后台针对车牌号进行管理, 通过用户名进行访问, 某一用户名可以为任意车号来进行缴费。用户名的注册可以不关联真实的信息(姓名、身份证号), 降低用户使用该 App 的门槛。但由于收费牵涉到一个发票的问题, 发票可以通过停车场的现场设备终端打印(通过终端进行缴费或是输入 App 用户名), 要想完成打印发票的流程, 则需要关联真实的信息。系统还融合了多种线上或线下支付方式, 包括现金、一卡通、银行卡、支付宝、微信电子支付等, 从支付途径上, 可以包含人工支付、自助支付等多种支付途径。同时, 对于停车费用的计算, 可以从更好的调度停车资源的角度出发, 根据停车不同的时间段、不同的位置及所停车辆的历史数据提供更加合理的停车费用计算方法。

### 3.2.2 停车资源管理及规划服务方案

面向停车场管理及规划建设单位, 平行停车系统实现了对整个停车资源(包括商业型停车场、路侧停车资源、私人停车资源)的优化分配, 使得各个停车场车位能够得到高效利用, 同时利用人工停车系统计算实验的结果, 可以为新停车场的规划建设提供具有针对性的实施方案, 而一般仿真系统落后并受制于实际停车系统的变化, 很难做到此点。

在由人工停车系统到实际停车系统的实现过程中, 首先对人工停车系统中某一区域进行停车场规划建设的实验与评估, 得到该区域最优的实施方案(包括硬件设备、管理人员的配置, 车位区域的规划, 营业模式、收费标准的制定等方面); 其次在实际停车系统中实现这种实施方案, 并在此过程中不断与人工系统进行互动优化; 最后, 一个实际系统中停车场建立的同时, 人工停车系统中也已有对应的“等价停车场”。

## 4 结论

停车系统是一个典型的复杂系统, 本文将 ACP 方法应用其中进行了一系列的研究, 提出了一套平行停车系统的设计方案。该方案将智能停车系统设计思想从传统的依附并受制于实际停车系统进行仿真诱导提升到信息物理社会系统(Cyber-Physical-Social Systems, CPSS)层面, 在物理空间和虚拟空间两个维度的空间中, 建立“等价”的两个停车系统即实际停车系统和人工停车系统, 二者通过平行执

行过程, 实现对彼此实时的相互影响及作用, 最终使得用户停车及停车资源管理及规划等停车系统相关过程变得简单、科学、高效。近年来, 将平行理论应用到城市智能交通领域<sup>[25-26]</sup>产生了平行交通管理系统(PtMS)<sup>[27]</sup>, 而停车系统是交通系统的重要组成部分, 在属性上, 二者具有很高的相似性, 尤其是 PtMS 在 2010 年亚运会的成功应用<sup>[28]</sup>, 为本文中基于 ACP 方法的城市平行停车系统的可行性提供了实例依据。虽然平行停车系统具体的构建方案还需要进一步细化与研究, 但是通过对该方案的其他特性(例如有效性、经济性、实时性、安全性、可靠性、鲁棒性等)的综合评价与分析, 进一步证实了平行停车系统在解决停车困难问题上所具有的优于其他智能停车系统且不可替代的研究及应用价值。

## References

- 2014 年国民经济和社会发展统计公报 [Z]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226\\_685799.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226_685799.html).
- 杨彪. 浅谈中国智能停车场系统集成技术 [M]. 中国公共安全(综合版), 2013(9): 168-171.
- 王秋平, 杨威. 西安市停车问题的解决方案初探 [J]. 交通科技与经济, 2011, 12(2): 32-34.
- 裴华艳, 付聚文. 基于物联网的智能停车系统的研究与设计 [J]. 铁路计算机应用, 2014, 24(1): 50-52.
- Lu R X, Lin X D, Zhu H J, et al. SPARK: A new VANET-based smart parking scheme for large parking lots [J]. IEEE Communications Social Magazine, 2009: 1413-1421.
- Grazioli A, Picone M, Zanichelli F. Collaborative mobile application and advanced services for smart parking[C]//IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management, 2013: 39-44.
- Pala Z, Inan N. Smart parking applications using RFID technology [J]. RFID Eurasia, 2007: 1-3.
- 岳学军, 刘永鑫. 基于 ZigBee 与地磁传感技术的停车诱导系统 [J]. 计算机应用, 2014, 34(3): 884-887.
- 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法 [J]. 自行化学报, 2013, 39(4): 293-302.
- 伦淑娴. ACP 理论的平行执行方式分类研究 [J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1602-1608.
- 宁滨, 王飞跃, 董海荣, 等. 基于 ACP 方法的城市轨道交通平行系统体系研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 22-28.
- Zhang N, Wang F Y, Zhu F, et al. DynaCAS: Computational experiments and decision support for ITS [J]. IEEE Intelligence Systems, 2008, 23(6): 19-23.
- Wang F Y, Jin N, Liu D R, et al. Adaptive dynamic programming for finite-horizon optional control of discrete-time nonlinear system with e-Error bound [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(1): 24-36.
- Gilbert N, Doran J. Simulating societies: the computer simulation of social phenomena [M]. London: UCL Press, 1994.
- Gilbert N, Conte R. Artificial societies: the computer simulation of social life [M]. London: UCL Press, 1995.
- Epstein J M, Axtell R L. Growing artificial societies: social science from the Bottom up [C]// New York: The Brooking Institute Press and the MIT Press, 1996.

- 17 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制 [J]. 控制与决策, 2004, 19 (3): 485-489.
- 18 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 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 11(4): 25-35.
- 19 王飞跃, 汤淑明. 人工交通系统的基本思想与框架体系 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 11 (2): 52-59.
- 20 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法 [J]. 中国基础科学, 2004 (5): 3-10.
- 21 张会, 于泉, 刘金广, 等. 平行系统理论在交通工程的应用浅探 [J]. 交通信息与安全, 2009, 27(149): 32-35.
- 22 Wang F Y, Yang L Q, Cheng X, et al. Network softwarization and parallel networks: beyond software-defined networks[J]. IEEE Network Magazine, 2015: 35-39.
- 23 王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 等. 复杂系统的平行控制理论及应用 [J]. 复杂系统与复杂科学, 2012, 19(3): 1-12.
- 24 Wang F Y. Agent-based control for networked traffic management system [J]. IEEE Intelligence Systems, 2005: 92-96.
- 25 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation system: concepts, architectures, and applications [J]. IEEE Transactions on Intelligence Transportation Systems, 2010, 11(3): 1-10.
- 26 Liu Y Q, Tian B, Chen S H, et al. A survey of vision-based vehicle detection and tracking techniques in ITS[C]// IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2013: 72-77.
- 27 Xiong G, Wang K, Zhu F, et al. Parallel traffic management for the 2010 Asian Games [J]. IEEE Transactions on Intelligence Transportation Systems, 2010: 81-85.

**杨柳青** (1973-), 女, 博士, 研究员, 美国佛罗里达大学电子与计算机工程系副教授, 信号处理及通讯网络所实验室主任, 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研究员, 主要研究方向为智能交通系统、物联网、水下通信、信号处理. E-mail: ylq.cas@gmail.com

**王飞跃** (1961-), 男, 博士, 研究员, 国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术研究中心教授和主任, 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研究员和主任. 国防领域“国家特聘专家”. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制.

E-mail: wangfeiyue@nudt.edu.cn

**张艳丽** (1989-), 女, 硕士, 青岛智能产业技术研究院专业技术工程师, 主要研究方向为平行理论、平行停车系统、信号与信息处理.

**韩双双** (1984-), 女, 博士, 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助理研究员, 主要研究方向为无线通信关键技术、智能交通、平行理论.

**杨坚** (1990-), 男, 博士, 主要研究方向为无线资源管理与分配技术、新型网络架构、智能交通.

**赵恺** (1984-), 男, 博士, 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助理研究员, 主要研究方向为无线通信关键技术、智能交通、平行理论.

**程翔** (1979-), 男, 博士, 北京大学副教授, 主要研究方向为海底观测网、水声通信、无线通信、信号处理.