

北京市轨道交通车站预约出行实践与思考

王倩^{1,2,3}, 郭继孚^{1,2,3}, 葛昱⁴, 梁超⁴, 线凯^{1,2,3}, 刁晶晶^{1,2,3}, 张磊^{1,2,3}, 马毅林^{1,2,3}

(1.北京交通发展研究院,北京 100073; 2.城市轨道交通北京市国际科技合作基地,北京 100073; 3.城市轨道交通运行仿真与决策支持北京市重点实验室,北京 100073; 4.北京市交通委员会,北京 100073)

摘要: 高峰时段过度集中的通勤客流是城市轨道交通运营管理工作中的一大挑战。北京市部分轨道交通车站依据同时段历史客流状态,采取站外限流的措施防止进站人数过多。在2020年新冠肺炎疫情防控期间,客流量不确定性高,客流管理难度加剧。为提前掌控客流情况,有效调控客流量,减少乘客聚集风险,创新性地在北京市轨道交通大客流车站开展预约实践,减少传统限流措施造成的站外排队和人员聚集,并保障轨道交通满载率控制和精准溯源的要求。首批选取的两座实践车站,每日早高峰预约用户约6 000人,总计可为乘客节省约240 h站外排队等待时间。实践证明预约出行的有效性,也为探索预约模式下新型交通组织方式积累了经验。

关键词: 预约出行; 城市轨道交通车站; 客流调控; 平衡供需

Practice and Thoughts on Reservation Travel in Beijing Metro Stations

Wang Qian^{1,2,3}, Guo Jifu^{1,2,3}, Ge Yu⁴, Liang Chao⁴, Xian Kai^{1,2,3}, Diao Jingjing^{1,2,3}, Zhang Lei^{1,2,3}, Ma Yilin^{1,2,3}

(1.Beijing Transport Institute, Beijing 100073, China; 2.Beijing International Science and Technology Cooperation Base of Urban Transport, Beijing 100073, China; 3.Beijing Key Laboratory of Urban Transport Operation Simulation and Decision Support, Beijing 100073, China; 4. Beijing Municipal Commission of Transportation, Beijing 100073, China)

Abstract: Excessively concentrated commuting passenger flow during peak hours presents a great challenge for urban rail transit operation and management. According to the historical passenger flow of the same period, Beijing adopted measures to limit passenger flow at several stations. During the prevention and control of COVID-19 in 2020, the high uncertainty of passenger flow makes it more difficult to manage passenger flow effectively. To acquire passenger travel demand in advance and decrease the possibility of passenger gathering while queuing, a trail of reservation has been carried out at several rail transit stations in Beijing, which can reduce the queuing and gathering of people outside the station caused by traditional flow restriction measures, and meet the requirements of fully loaded rate control and precise traceability. In the first two pilot stations, the daily reservation users are about 6,000 during peak hours, which has helped save about 240 hours of waiting time outside the station for passengers. Practice has proved the effectiveness of travel reservation strategy, and provides experience for exploring new transportation management methods under the reservation mode.

Keywords: travel reservation; urban rail transit stations; passenger volume control; supply-demand balance

收稿日期: 2020-06-05

作者简介: 王倩(1989—),女,内蒙古巴彦淖尔人,硕士,工程师,主要研究方向:交通大数据分析与应用、出行需求建模。E-mail: wangq@bjtrc.org.cn

1 实践背景

预约出行是在交通运输系统中,利用移动互联网、无线通信等科技化手段,依托全局供需优化算法,为出行者提供一种需求响应式出行服务的模式。其思想是借鉴预约就医、预约就餐、预约停车等模式,通过对供

给和需求的调节,解决因为需求过量集中造成无序和低效等待的问题。已有研究通过理论算法、仿真模型、应用实践等多种方式,证实了预约有助于调节供需、提升通行效率。文献[1]基于拥堵收费调节模型构建了预约出行模型,仿真结果表明预约可减少约50%因无效等待造成的损耗。文献[2]通过理

论模型对高速公路预约通行系统(Highway Reservation System, HRS)与匝道限流控制系统的优劣开展了比较研究,证明了相对于匝道控制系统,预约系统有更大的优势。文献[3]提出预约系统根据车辆在高速公路上的当前位置,计算出其在下一时刻的位置,并为其预留相应的位置资源,然后通过仿真验证了这一做法可以显著提高交通系统效能。文献[4]基于对预约出行市场占有率的分析发现,若一部分自动驾驶车辆使用预约出行,可降低至少15%的高峰时段出行社会成本。文献[5]在动态交通分配中引入交叉口评级的双层优化模型,来实现出行时间最小化,并通过案例研究发现,当参与预约的比例在20%~100%范围内时,出行时间可以减少10%~40%。北京交通发展研究院通过预约调节北京市回龙观桥早高峰通勤者的出行时间后发现,每个用户通过堵点的时间可减少17~39 min,交通系统平均节约76~97 min的拥堵时间^[6]。然而,这些研究主要集中在高速公路预约、预约停车、预约公共交通等方面,没有在城市交通系统中,尤其是针对高峰通勤客流的实际应用,其中一个原因是城市交通系统的开放性、随机性。现阶段以移动互联网为代表的先进科技成果在交通领域的广泛应用,在某种程度上使得交通系统更加可控、信息更加透明,给利用预约出行缓解供需失衡的状况提供了契机。

预约出行的核心特点之一在于系统级客流精细化管控。借助于预约出行,可在需求旺盛的高峰时段调节需求分布,将在时空上高度集中的出行需求分散化,避免出行过度集中造成无序拥挤。城市轨道交通系统由于快速、准时、大运量的特点,高峰时段承载了大量的通勤客流,部分车站的高峰瞬时客流甚至超出其容纳能力,出现供给与需求极不平衡的状况,站方为了避免站台和站内拥挤,通常采取站外限流措施,利用限流围栏控制站内人流密度,乘客只能通过拥挤排队来保证高峰出行的权利。2019年北京市轨道交通全网常态化限流车站共92个,以地铁5号线天通苑站为例,常态下工作日早高峰进站量约2.6万人次,严重超出车站容纳能力,站方通过站外导流围栏和分批进站的方式控制进站人数,乘客站外平均排队时间10~20 min。如借助预约理念,在限流车站实施预约出行,事先调节客流的到站分布,即可缓解站外排队现象,为乘客节约大量的

排队等待时间。

在新冠肺炎疫情防控期间,对人流密度和车厢满载率提出了更高要求,这给轨道交通客流管理带来更大挑战。一方面,由于疫情形势变化存在不确定性,无法预知潜在增长的客流需求,例如在客流激增情况下,受断面满载率要求站外限流同样会造成人员聚集,不利于疫情防控;另一方面,乘客无法提前知晓地铁运营方启动限流的时间及站外排队情况,需要到达地铁站后才能获悉实际情况,存在长时间站外排队风险。如借助预约手段,则可提前掌控需求,实施客流精准调控,合理安排运力和进行客流组织。这不仅可以提升乘客出行体验,也有助于疫情防控工作的快速溯源管理。因此,北京市在疫情防控期间,选取了地铁大客流车站开展预约进站的实践工作。依托预约出行思路,通过预约将乘客在站外的排队转变为线上排队,减少站外集聚风险。

2 城市轨道交通预约出行系统设计

为实现地铁车站通过预约出行控制客流到达分布,可基于实时通信和定位技术,利用可扩展的通用云平台构建预约出行服务系统,对出行需求及交通资源实施综合管理。出行者事先向系统传达未来时刻的出行需求,系统经供需匹配计算生成优化出行方案,反馈给出行者并按此安排运力。对于需求集中的时段和地点,通过合理有效的机制分配系统余量,鼓励用户调整出行方案;对于需求量不大的平峰时段,按照需求调度车辆、安排运力,按需提供灵活的交通服务。

预约进站实施难点在于如何合理安排系统余量管理的粒度,即预约时段的间隔,既要做到客流精准调控,又能方便乘客出行。时段过细,乘客很难精准控制到达车站外的时间(以下简称“到站时间”),预约效果会大打折扣;时段过粗,则失去了客流精准调控的意义,难以改变高峰时段人员聚集的现象。因此,系统需对城市轨道交通全网客流大数据进行分析,研究乘客出行习惯和时间规律,并通过仿真模型预先评估效果,对客流到站分布进行精准管理、合理调节,保证预约出行的乘客能够随到随走、安全有序进站乘车,提升乘客出行体验。

综上,预约系统主要由用户平台、数据平台、仿真计算平台、系统优化平台、云服

务器、云数据库等部分构成，包含供需匹配、动态仿真、全网配额计算集群、核验服务等关键功能模块(见图1)。其中，全网配额计算集群模块主要根据地铁运力数据、历史进站客流数据，使用面向全网的配额算法，开展预约配额计算，并根据车站实际客流情况动态调整配额。计算得到的预约配额会定期同步到预约服务平台进行发放。核验服务模块供验证使用，核实用户是否按照约定进站，实现对预约用户的管理，并将核验信息同步至预约服务，为后续的出行记录、预约配额提供依据。

3 北京市轨道交通预约出行的实践

3.1 实践车站选择

考虑疫情期间城市轨道交通限流车站的客流规模及实施条件，选择北京地铁昌平线沙河站和5号线天通苑站作为首批实践车站，正式试点开始时间为2020年3月6日。沙河站和天通苑站是北京市轨道交通网络中工作日进站客流最大的2座车站，早高峰(6:30—9:30)进站量高达3万人次，高峰小时进站量1.2万人次·h⁻¹。这两个站常态时工作日早高峰均采用站外限流，乘客在站外排队长度可达500 m，需10~20 min才能进站。预约出行实施初期，北京市轨道交通各车站客流均未恢复日常水平，而这两个车站的客流回升速度较快，远超全网平均水平。随着客流进一步增加，其面临的防疫压力相对较大。

3.2 实施规则

在保障实践工作顺利实施的同时，不影响未参加预约乘客正常进站乘车的基本原则下，在实施前制定了相应的规则，包括预约服务的时间及对象、预约名额分配、预约通道管理办法等。

3.2.1 时间范围及对象

考虑到实践车站客流高峰分布情况，选取工作日早高峰时段开展预约出行实践工作。从实施当日起，在选定车站工作日早高峰时段经由实践车站进站乘车的乘客，都可通过预约进站乘车。

实践车站的预约出行并非强制措施，完全由乘客自愿参加。未参与预约出行的乘客仍可按照以往方式正常进站乘车。不熟悉智能手机的老年人和其他特殊人群不需要提前预约也可以从预约通道进站乘车。

3.2.2 预约通道设置及管理

为保证乘客在约定时间到达车站后直接进站乘车，在实践车站单独开辟了专供预约乘客使用的进站通道，并在通道入口处安装核验设备，以检查乘客是否预约以及是否在有效期内。

根据优化算法和仿真结果，只要有用户参与预约，即使不设专用通道，也能通过系统对用户需求的合理调节，从系统层面减少乘客排队等待时间(见图2)。为验证不同通道设置方式的效果，便于在更多车站推广应用，实践过程中根据车站实际情况采取不同方式设置预约进站通道。其中，沙河站将原高峰封闭进站口设置为预约专用进站口，未预约的乘客需从其他进站口进站；天通苑站则仅在普通进站口增设一条预约核验通道，预约乘客不用在限流围栏处排队，但需与其他乘客由同一个入口进站乘车。

3.2.3 名额设置及分配原则

预约出行系统依托大数据仿真模型，以

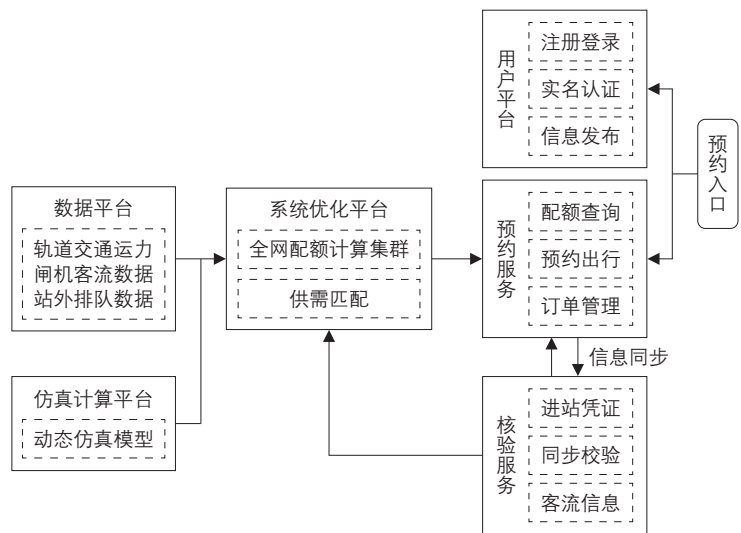


图1 城市轨道交通预约出行系统设计架构
Fig.1 Framework of travel reservation system of urban rail transit

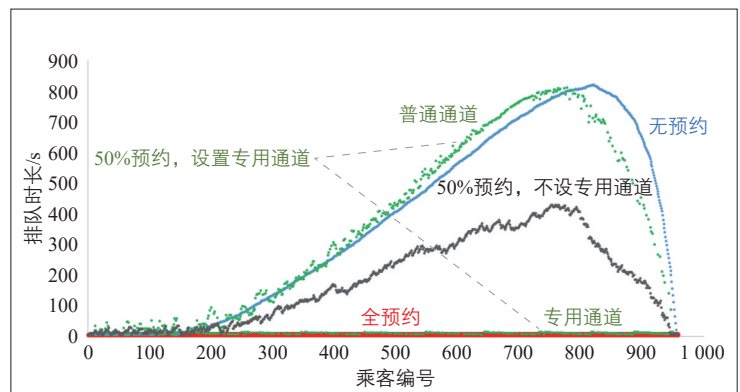


图2 不同参与率下乘客排队时间仿真
Fig.2 Passengers' queue time at different participation rates

车站高峰时段进站总需求量及各时段实际进站量分布情况为需求条件,以实践车站各时段实际进站能力为供给条件,基于预计参与预约乘客的比例进行实践车站早高峰配额计算,保证在不影响其他乘客进站的前提下,让预约乘客不排队进站。同时,根据实际参与预约乘客比例的变化,动态调整各时段预约进站名额,确保乘客按照预约时间到达即可直接进站乘车。

实践过程中以10 min为间隔分时段设置预约进站名额。系统提前一日计算好下一个工作日各时段的名额,开放预约。时间间隔设置的依据主要是在客流精准调控和满足乘客需求之间寻找平衡点,通过分析乘客历史刷卡数据,分析总结乘客的出行规律,包括常旅客比例、进站时间稳定性和出行时间弹性,结合不同粒度下客流调控的效果,最终选取10 min的间隔粒度(见图3)。

3.2.4 预约方法及流程

工作日早高峰期间在实践车站进站乘车的用户,可通过微信公众号或北京地铁APP、亿通行APP等多个途径,使用手机进入系统,查看各时段可用预约进站名额,预

约有空余名额的时段。预约成功后,系统将在约定的可进站时段显示进站二维码(仅限一人一次使用)。乘客由预约通道核验二维码快速进站乘车,不受站外限流排队影响。

通过大数据分析乘客的进站习惯,同时考虑乘客的接受度,系统在预约时段前后各预留了10 min弹性时间,乘客只要在弹性时间范围内到站,二维码均有效。举例来说,某乘客预约了8:00—8:10由沙河站进站,只要在7:50—8:20到达沙河站的预约通道均可以核验进站。没有成功预约的乘客,以及错过预约进站时段的乘客,不能经由预约进站专用通道进站,需要从其他进站通道排队进站。

3.3 仿真效果与配额计算

3.3.1 预约进站仿真模型

首先通过现场调研与视频监控等手段,收集限流车站相关数据,包括不同日期不同时间的到站人数、安检通过人数及进站人数。通过数据处理分析,计算出站台、车辆的承载能力限制,安检进站能力限制,不同时段进站客流量,以及站外限流排队人数、队列长度、平均排队时长。

其次,基于对历史数据的分析,构建限流轨道交通车站仿真模型,模拟乘客进站排队过程,对比不同预约场景下进站限流排队的情况,验证不同参与比例下预约出行的实施效果,包括无预约、一部分乘客预约、全部乘客预约等场景。

结果显示,在一部分乘客参与预约的情况下,预约乘客按照约定时间到达车站,可节省排队时间,同时非预约乘客进站时间基本不受影响。参与预约的乘客比例越高,节省站外排队时间的效果越显著。当预约比例为30%时,整体站外排队时间可以减少22%,队列长度缩短23%;预约比例为50%时,整体站外排队时间可以减少44%,队列长度缩短38%;预约比例为80%时,整体站外排队时间可以减少78%,队列长度缩短64%(见图4)。

3.3.2 预约配额计算

配额计算是在满足轨道交通网络断面满载率要求下,计算不同时段进站名额的过程。配额计算遵循系统效益最大化(即在满足控制目标的前提下,尽可能利用轨道交通的服务能力,实现出行效用最大化,包括周转量、乘客错峰程度等)、动态调整(根据轨

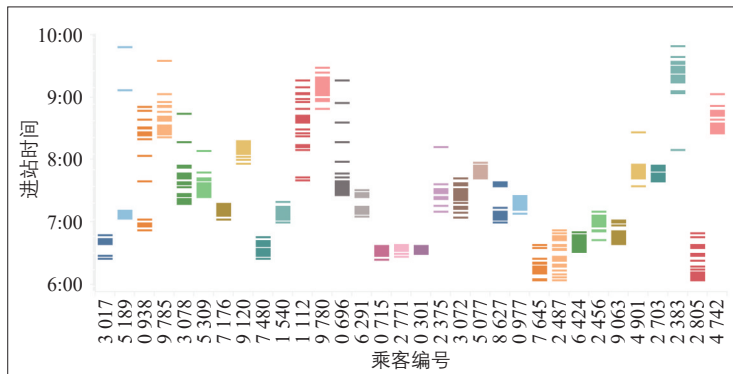


图3 部分乘客刷卡进站时间分布

Fig.3 Distribution of passengers' entrance time

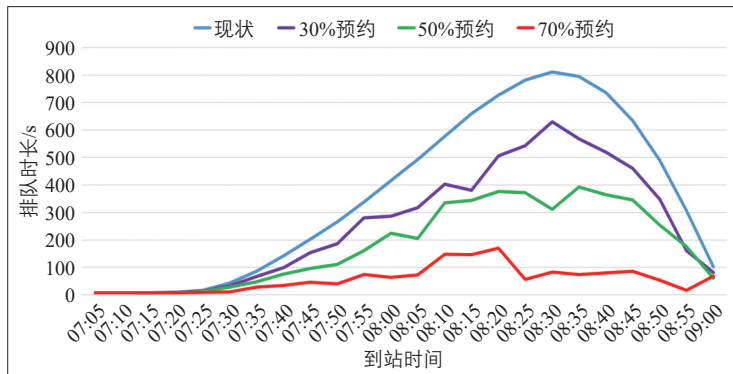


图4 不同预约情景下排队时间对比

Fig.4 Queue time under different reservation scenarios

道交通运力及客流需求变化进行动态调整)、公平性和可达性(保证轨道交通网络在每个时段、每个车站对之间均有配额)原则。

配额计算原理是根据乘客出行需求的时空分布及轨道交通网络内乘客路径选择,计算单位时间间隔内进站客流对于瓶颈断面客流量的边际贡献。在瓶颈断面客流量满足满载率控制目标的前提下,按照车站对关键断面的边际贡献度,在效用最大化前提下,通过优化算法计算不同车站的限流要求,进而计算各站在单位时间间隔内的进站量配额。在计算得到每个时段的总配额量基础上,按照预约参与比例,设置各时段预约名额,并根据预约参与度变化动态调整预约名额数量。

3.4 试点效果

预约进站实践开展以来,参与人数不断增加,预约出行服务逐渐受到更多乘客认可。实践开展不足半年,预约系统总注册用户超6.8万人,累计预约56万人次,实际预约进站43.2万人次,日最高预约进站6604人(见图5)。

随着疫情得到控制,实践车站的进站客流逐渐恢复,沙河站和天通苑站的常规进站通道均已出现站外排队现象,限流排队长度增加。截至2020年7月,早高峰平均限流排队时间为4~7 min。对比预约进站通道,由于预约配额根据每日的客流量和预约通道能力动态调整,预约乘客按照预定时间到站均可以无排队快速进站。相比之下预约乘客均没有站外排队时间。结合同时段预约进站人数计算,两站每日高峰时段为预约乘客节省的总进站时间约240 h。随着轨道交通客流进一步恢复,预约出行将在限流车站发挥更大的作用。

为了验证预约出行对于个体出行的作用,通过微信平台面向地铁预约进站用户开展了问卷调查,回收有效问卷750份,其中沙河站用户为648份(占有效问卷的86%),天通苑站102份(占有效问卷的14%)。

结果显示,尽管设置了弹性调整时间,但是,用户出行过程中大部分情况下能够按照预约时段进站。由图6可见,预约用户进站时间符合泊松分布规律,其中55.7%的用户在预约时段内验码进站,20.2%的用户在预约时段前10 min进站,24.1%的用户在预约时段后10 min进站,说明所选取的时间间隔比较合理。

实施预约后,确实有一部分乘客的出行习惯被改变。通过进一步分析预约实践开展前后乘客的出行习惯发现,预约可以有效地调节出行者出发时间,缩短进站时间。在受访者中,42%的乘客预约后的出发时间晚于预约前,77%的乘客因预约后不用排队而缩短了进站时间。对沙河站预约进站乘客的来源地进行分析,有44%的乘客在实施预约出行之前从其他进站口进站乘车。这说明通过

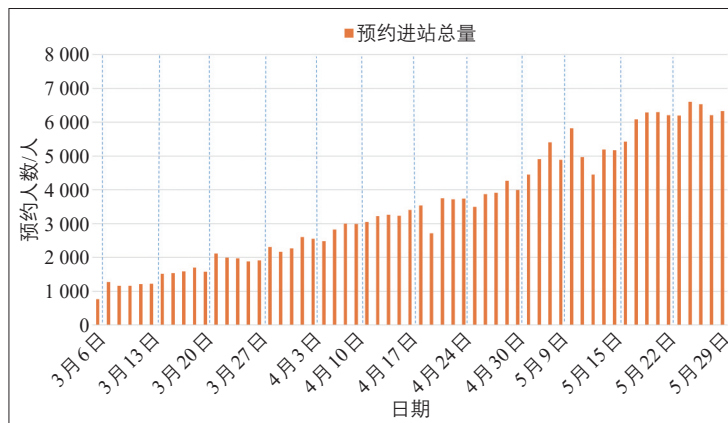


图5 单日预约进站量变化情况

Fig.5 Change of daily passenger loading volume under travel reservation

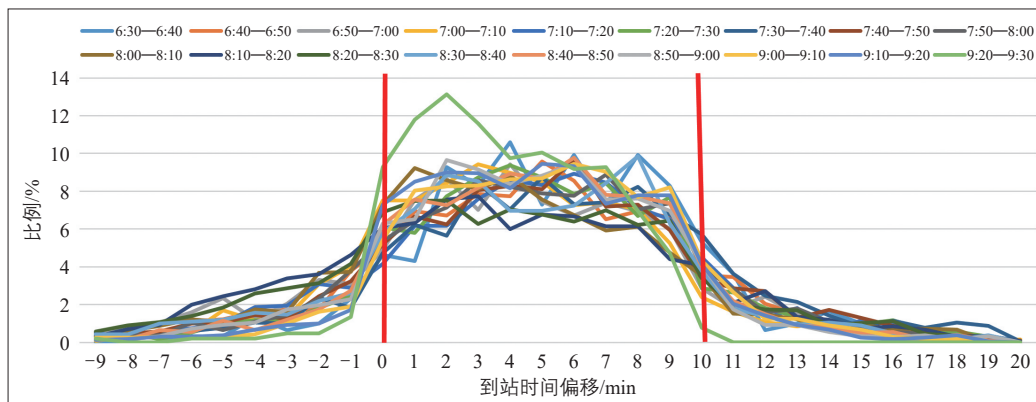


图6 预约乘客分时段到站时间分布

Fig.6 Distribution of passengers' arrival time by reservation period

适当的管理手段，乘客愿意改变原有出行习惯。

4 结语

北京市轨道交通预约出行实践改变了传统粗放式的限流管理，通过更精细化的客流管理，减少乘客站外排队，提升出行体验，取得了良好效果。实践结果表明，乘客对预约出行认可度较高，大部分用户认为预约出行方便了高峰出行，希望这种模式能够延续。这进一步证明了预约模式不仅可以用于疫情防控期，也可以用于常态化限流管理。

预约出行是一种新型出行服务模式，能够在交通资源有限的情况下，通过技术手段精准地匹配供需，代表着未来交通发展方向。除轨道交通外，城市交通中道路、公共汽车交通等多个子系统同样面临需求时空分布不均、供需失衡的问题。如在道路系统实施预约出行，可以提升供需信息透明度，避免焦虑造成的盲目出行导致通行能力下降；在公共汽车交通系统中实施预约出行，可灵活安排线路、车站和运力，以更低的成本提供更符合需求的出行服务。未来可进一步探索预约在不同子系统中的应用及实践，逐步提供全网络、全系统的预约出行服务模式。

随着自动驾驶、智慧化路侧设备相关技术飞速发展，在居民的出行习惯、智能运载工具以及基础设施信息化发展共同推动下，未来预约出行将会更加方便，更加融入日常生活，也会变得越来越容易，逐渐成为出行常态。在此趋势下，可从技术研究、标准规范制定等多个层面深化预约出行的研究，进

一步扩大实践范围，开展多场景下的预约出行服务，不断提升预约出行的接受度。借助于预约的手段，探索让乘客更广泛地参与交通治理的途径，推进未来交通系统有序转型。

参考文献：

References:

- [1] Koolstra K. Potential Benefits of a Freeway Slot-Reservation System: Queuing Costs Versus Scheduling Costs[C]//Urban Transport Systems Conference, Lund, Sweden, June 7-8, 1999.
- [2] Edara P, Teodorović D. Model of an Advance-Booking System for Highway Trips[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2008, 16(1): 36-53.
- [3] 柴蓉, 唐伦, 肖敏, 等. 高速客运通信系统中的动态资源预留[J]. 电信科学, 2009, 25(10): 48-51.
Chai Rong, Tang Lun, Xiao Min, et al. Dynamic Resource Reservation in High-Speed Transportation Communication System[J]. telecommunications science, 2009, 25(10): 48-51.
- [4] Lamotte R, de Palma A, Geroliminis N. On the Use of Reservation-Based Autonomous Vehicles for Demand Management[J]. Transportation research Part B: Methodological, 2017, 99: 205-227.
- [5] Patel R, Venkatraman P, Boyles S D. Optimal Placement of Reservation-Based Intersections in Urban Networks[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(1): 781-792.
- [6] 深圳市城市交通规划设计研究中心有限公司. 盐田北综合车场等十个综合车场建设需求及总体方案研究[R]. 深圳: 深圳市城市交通规划设计研究中心有限公司, 2017.
- [7] 滕靖, 杨晓光. 面向换乘枢纽的公共汽车协调调度模式研究[J]. 城市交通, 2006, 4(5): 19-25.
Teng Jing, Yang Xiaoguang. A Study on Bus Coordination Dispatching Pattern for Transit Transfer Centers[J]. Urban Transport of China, 2006, 4(5): 19-25.
- [8] 秦政. 基于数据挖掘的客流特征提取及公交调度优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [9] 刘亚萍. 非独立型立体停车库的存取策略优化及车辆调度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
Liu Yaping. Research on the Storage-Retrieval Strategies Optimization and Vehicle Scheduling for Non-Independent Stereo Garage[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

(上接第88页)