

• 交通运输 •

文章编号: 1002-3100 (2018) 10-0056-06

基于仿真的共享单车调度优化研究

A Simulation-based Optimization Model for Scheduling Dockless Sharing Bicycles

孙怡璇, 周雨珊, 丛羽茜, 刘 明

SUN Yixuan, ZHOU Yushan, CONG Yuxi, LIU Ming

(南京理工大学 经济管理学院, 江苏 南京 210094)

(School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

摘 要: 近年来, 无桩共享单车在全国各地蓬勃发展, 在有效解决最后一公里出行的同时, 也带来了单车调度重置难题。由于无桩共享单车没有固定桩点, 其在区域内的分布受到各种随机因素的影响, 因此传统有桩共享单车的调度策略难以直接适用。基于此, 文章通过对某区域共享单车的使用情况进行实地调研, 获得该区域内的单车使用规律和影响因素; 然后结合系统动力学方法, 运用 AnyLogic 软件构建共享单车流动仿真模型; 通过仿真模拟, 获得动态实时数据和区域分布状态; 最后, 构建单车调度重置优化模型并进行求解。算例分析表明, 文章提出的共享单车调度优化方法能够有效地形成调度决策方案, 提高共享单车企业的运营效率。

关键词: 共享单车; AnyLogic; 仿真建模; 调度优化; 重置

中图分类号: F506 文献标识码: A

DOI:10.13714/j.cnki.1002-3100.2018.10.015

Abstract: In recent years, dockless sharing bicycles have flourished throughout China, providing an effective solution to the issue of the one last kilo to destinations. Yet it is fol-

lowed by the problem of redistribution within the dockless bike sharing system. Without fixed stations, the distribution in a certain area is affected by various random factors. Therefore, the dispatching strategy of traditional sharing bicycles does not adapt to the new situation. According to the reality, we obtain the applied rules and affecting factors of sharing bicycle in a certain area on the basis of field research on its usage. Combing with the theory of system dynamics, the simulation model of bicycle flow is built by AnyLogic software and the real-time data and regional distribution status of the sharing bicycle can be acquired. Last but not least, an optimization model for scheduling and reset is constructed and solved. The example demonstrates the effectiveness of the decision scheme of sharing bicycle scheduling optimization proposed in this paper and this scheme can drive the operational efficiency of sharing bicycle enterprises significantly.

Key words: sharing bicycle; AnyLogic; simulation modeling; scheduling optimization; reset

0 引 言

2016 年起, 在“共享经济”热潮的推动下, 共享单车开始活跃于全国各大城市。相较起源于欧洲等地的城市公共自行车系统, 共享单车无需设置停靠桩, 仅通过车身上集成 GPS 和通讯模块的智能锁即可定位。用户骑行单车到达目的地后, 可以就近停放在路边合适的区域, 关锁即实现电子付费结算。这一“随取随用”的特点, 为真正解决居民出行“最后一公里”问题提供了有效方案。随着移动支付和智能电子设备的发展, 这种创新性的模式不仅在全国迅速普及, 更由摩拜、ofo 等公司海外业务的开拓而扩散到了新加坡、巴黎、伦敦等地 (Shen Y 等, 2018)^[1]。然而, 大量单车涌入城市的大街小巷, 在便利居民出行的同时也给城市管理带来了挑战。以往政府主导建立的有桩公共自行车系统, 拥有经事先规划而设立的停车桩, 因而单车的借还较为有序; 而无桩共享单车由企业运营管理, 常常集中投放于交通流量较大的地点, 且完全不受固定停车桩的限制, 具有离散化、随机分布的特性, 更容易出现供需关系不平衡、部分区域大量车辆堆积的情况。因此, 及时对共享单车进行调度重置是提高单车使用效率、管理水平的一个重要保障。

文献资料检索发现目前关于共享单车的理论研究大多围绕着传统有桩公共自行车展开, 而针对当下无桩共享单车的调度问题, 定量的相关研究甚少。在无桩共享单车分布方面, Liu 等 (2018) 结合因子分析和卷积神经网络技术设计了一种推理模型, 用于预测无桩共享单车在一个城市内的分布状况^[2]。Kadri 等 (2016) 使用分支和边界算法, Pal 等 (2017) 应用混合嵌套大邻域

收稿日期: 2018-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71771120); 教育部人文社科基金项目 (17YJA630058); 南京理工大学本科生科研训练“百千万”计划立项资助省级项目 (201710288036X)

作者简介: 刘 明(1983-), 男, 江西金溪人, 南京理工大学经济管理学院, 副教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 数据驱动的智能物流优化。

搜索与变邻域下降算法, 分别建立了混合整数线性规划模型用于解决大规模的共享单车调度问题^[3-4]。Caggiani 等 (2018)、Zhang 等 (2017) 研究了无桩共享单车的动态再分配问题并建立了相应的混合整数规划模型, 在他们的模型中, 考虑了共享单车的库存水平、用户到达预测、自行车重新定位和车辆调度路径优化^[5-6]。王嘉薇等 (2018) 从共享单车的时空分布状况入手, 建立时空分布模型进行研究, 根据所给信息分时间段建立了调度运输线性规划模型 (VRP 模型)^[7]。吴满金、董红召等 (2015) 结合禁忌搜索算法的爬山性能和遗传算法算子交叉、变异功能, 求解共享单车的多目标调度优化模型^[8]。骑行数据显示, 用户骑行单车多往返于居民区及周边地铁站点、公交站点, 或城市中心区域、商业区域, 呈现较明显的集聚特征^[9]。此外, 主流共享单车的使用范围以 3~5 公里为主, 近七成用户骑行不超过 8 公里^[10]。针对这一特性, 徐建闽等 (2017) 提出了共享单车的多层次分区调度方法, 给出了不同区域间的调度策略^[11]。

为进一步探究无桩共享单车的调度重置策略, 本文首先对某一区域内共享单车的运行情况进行了实地调研。在总结该区域内共享单车使用规律和影响因素的基础上, 运用 AnyLogic 软件构建了基于系统动力学、离散事件的共享单车流动模型。通过仿真模拟, 获得了共享单车的动态实时数据和区域分布状态。并且通过构建共享单车的调度重置优化模型, 求解得到了综合出行规律、运输成本的调度决策方案, 以期为最大化满足用户出行需求、提升共享单车运行管理效率提供借鉴。

1 问题的描述与建模

1.1 问题描述。本文选取南京理工大学校园为研究对象, 对该区域内的共享单车运行情况进行实地调研测算。由于高校用户占全部用户比例较高, 出行规律性强、具有代表性, 在城市的更大范围中, 校园共享单车的调度策略也有借鉴意义。南京理工大学校园整体地势平坦, 俯瞰呈矩形形状, 并由数条主干道路南北贯穿。校园占地面积达 3 118 亩, 教学区、生活区、办公区等功能区划分明确且相隔距离较远, 导致师生日常出行需跨越多个区域。因此, 方便快捷的共享单车成为了校内出行的首选。校园中现有 ofo、Mobike、HelloBike、乐行校园等多类共享单车, 单车数量达千余辆, 师生中注册用户占比 85% 以上, 日骑行次数达万余次。大量的运行数据能够为后续系统参数的设定提供依据, 研究结果对于其他区域的调度规划也有一定的借鉴和参考价值。

校内共享单车现有调度重置全部由人工完成, 具体表现为发现单车堆积或者供应不足时, 直接派遣调度车和工人从单车堆积区域向供应不足的区域运送车辆。此种方式的调度时间不固定, 调度数量和地点完全由工作人员自行判断, 调度整体效率不高。目前普遍大规模调度作业的时间集中在每日凌晨时分, 此时单车借还处于最低水平。工作人员的调度目标为, 在不影响用户正常使用的前提下, 对区域内各主要用车点的单车进行重置, 使之能够尽量满足次日的使用需求。

1.2 仿真模型。本文应用 AnyLogic 软件构建共享单车流动仿真模型。AnyLogic 是一款支持多方法混合建模的仿真软件, 具有直观友好的图形界面和灵活开放的编程方式, 同时提供各类专业的建模工具库, 适用于多领域的复杂系统。其建模过程基于特定的目标进行, 使得模型在同类问题间具有通用性。利用系统提供的数据功能和分析优化工具, 可以观察及分析仿真结果, 总结用户骑行单车的规律特征, 为后续调度优化方案提供依据。本文基于其中的系统动力学表达单车运行中的供需变化, 使用离散事件仿真模拟用户借还与骑行单车的行为, 动态演示区域内车辆流动情况。以子区域为单位建立概念模型, 如图 1 所示。

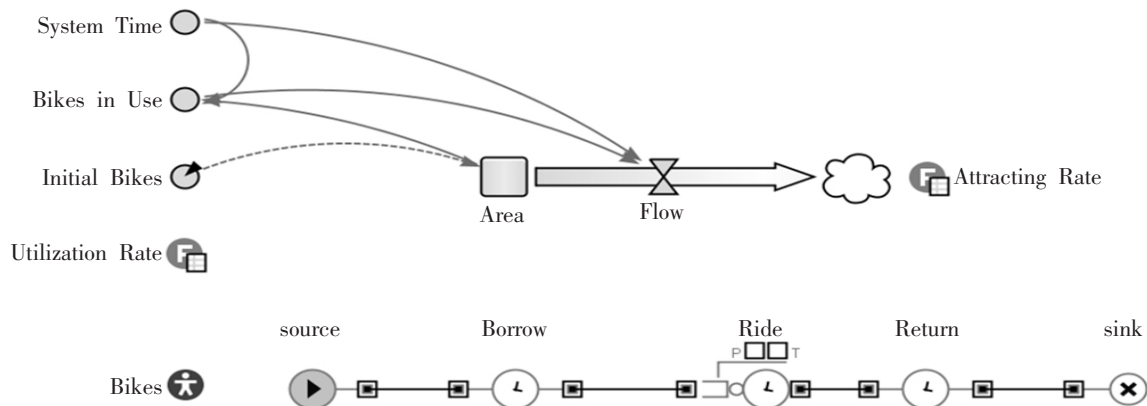


图 1 仿真概念模型

(1) 共享单车供需变化模块。单车在区域间流动主要受以下因素影响: ①时间因素: 由于不同时间用户出行情况会有所不同, 且有明显的集中性, 从而形成车辆需求的高峰时段和低谷时段。②空间因素: 各区域内投放共享单车的数量事先确定, 但需求量受到不同分区用户交通工具选择偏好、该区域的性质、道路情况等复杂因素的影响, 使得共享单车的供给与需求在空间上并不均衡。

在仿真系统中, 首先需输入各子区域单车初始投放量, 模拟开始后, 用户通过手机应用软件或直接步行定位到可用车辆, 被预约车辆进入待使用状态, 即该区域可使用单车总量减少。这一过程中用户需求的动态变化通过该区域的单车使用效率反映。随后, 根据两区域间的吸引关系, 将骑行车辆分配至不同的流量中, 分别进入到下一模块。过程中涉及的主要变量及参数设置如表 1 所示。其中, 分时段使用率 (Utilization Rate)、区域间吸引率 (Attracting Rate) 分别表示各区域单车借出比例及流入量大小, 比率越高, 说明该区域内单车的借还需求越大。由于两者均为以时间为自变量的非标准函数, 可对各时段每个区域单

车借还数量进行统计后, 计算得到该时段平均值, 再由 AnyLogic 支持的特殊类型函数——表函数, 进行插值计算, 得到每一时刻的估计数值。

表 1 变量定义

代码	名称	定义	类别
Area	单车容量	区域内某一时刻可使用的共享单车总数	存量
Flow	借出量	自某一区域流向另一区域的实时单车数量	流量
Bikes in Use	使用量	区域内已被使用, 处于借车状态的单车数量	动态变量
System Time	系统时间	系统运行的小时数	
Initial Bikes	初始量	区域内共享单车初始投放量	参数
r	流动系数	在模拟时随机产生并时刻变化	
Utilization Rate	分时段使用率	单位时间内借出量/初始时刻单车总量	表函数
Attracting Rate	区域间吸引率	向某一还车区域流入量/单位时间内借出总量	

以上变量间的函数关系在模型中的表示如下:

```
Area(initial value)=Initial Bikes
System Time=time()/hour()
Bikes In Use=Area*Utilization Rate(System Time)*r
Flow=Bikes In Use*Attracting Rate(System Time)
```

(2) 用户用车行为模块。该过程中借车行为由上一阶段产生, 以用户定位到所需车辆为起点, 包含扫码解锁、用户骑行、停放车辆、结清费用等过程所需时间。使用 AnyLogic 中的流程工具箱进行建模, 各流程定义如表 2 所示。其中, 起始点 (source) 以恒定速率产生数量为借出量 (Flow) 的实体。用户借还车辆、骑行使用延迟时间表达, 借车时由于车辆类型及开锁方式的不同, 用户借车时间在一定范围内波动; 骑行所需时间根据起止区域间相对距离、平均骑行速度由系统计算得到; 归还车辆时, 用户需要找到合适的停车位置再关闭车锁, 所需时间根据区域交通情况不同而波动。系统产生的实体进入结束点 (sink) 后, 车辆重新进入可使用状态, 系统执行 Action 代码, 增加还车区域单车总量 (Area) 数值。

表 2 共享单车用车流程定义

流程代码	流程名称	定义	属性
source	起始点	用户定位到所需车辆	到达实体数: Flow
Borrow	借车	打开车锁, 成功取走单车	到时延迟, 服从 triangular 分布
Ride	骑行	用户从区域内某处骑行到另一区域内目的地	延迟时间=区域间相对距离/骑行速度
Return	还车	停放单车, 上锁后结清费用	到时延迟, 服从 triangular 分布
sink	结束点	系统显示还车完成	Action: 进入时执行代码

各子系统通过上述单车借还过程彼此关联, 形成如图 2 所示的整体系统。执行模拟实验, 运行完毕后可得到区域中单车总量在一天时间内的变化数据。由此可以总结出基于仿真模拟的校园共享单车流动规律, 并将运行结果作为优化阶段的初始输入数据。

1.3 优化调度模型。由于调度人员工作时间集中于午夜或凌晨时刻, 此时段 (0 时至 6 时) 内单车借还量极少, 故假设车辆处于静止状态, 可将调度分配问题抽象为运输问题。首先, 我们根据仿真模型运行结束后各分区内单车总量与初始投放量之间比较的结果确定车辆的供需点。比较规则如下: 设仿真模型运行结束后第 i 个分区单车数量为 B_i , 而该区域初始投放设计量为 A_i ; 若 $B_i > A_i$, 则 i 点为供应点, 否则该点为需求点, 并将两者差额 ($|A_i - B_i|$) 作为该区域需要调出 (或调入) 的单车数量 $S_i (D_j)$ 。在明确了各供应点 $i (i=1, 2, \dots, m)$ 和需求点 $j (j=1, 2, \dots, n)$ 后, 我们利用整数规划方法进行建模求解, 得到各分区需要重新分配的单车数量。定义决策变量为 X_{ij} , 代表需要从供应点 i 移动到需求点 j 的共享单车数量, 单位调度成本 a_{ij} 表示将一辆共享单车移动一公里的成本, 任意两个区域之间的距离 d_{ij} 根据实地调查测算给出。则上述调度优化问题可以表达为:

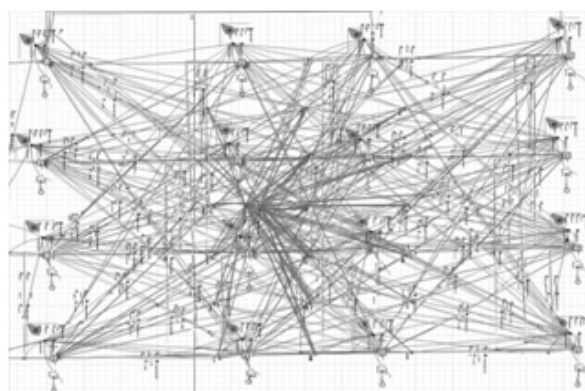


图 2 区域间共享单车流动仿真模型

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \times d_{ij} \times x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i, \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq D_j, \quad \forall j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

$$x_{ij} \in N^+, \quad \forall i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n (m+n=16) \quad (4)$$

目标函数 (1) 是最小化所有区域之间重新分配共享单车的成本。约束条件 (2) 表示任意一供应点所能提供的共享单车数量须小于或者等于该区域所能供应的单车数量。约束条件 (3) 表明调度模型要尽可能满足各需求点的需求。约束条件 (4) 要求所有决策变量都是非负整数。

2 算例分析

2.1 参数设置。通过实地调查与数据测算,确定了南京理工大学校园内共享单车的初始投放量及每日 0 点的单车分布情况。结合共享单车公司的后台数据,以及师生出行方式、课程时段和住宿情况,将校园划分为 16 个子区域,并估算了各子区域的单车使用效率及流动比例,结果如表 3 所示。

表 3 区域划分及调度前后共享单车总量

分区编号	分区名称	运行结果	调度目标数量 (初始投放量)	分区编号	分区名称	运行结果	调度目标数量 (初始投放量)
A ₁	3 号校门	43	80	A ₉	1 号食堂	56	20
A ₂	1 号校门	66	70	A ₁₀	1 号宿舍区	185	150
A ₃	校医院	7	20	A ₁₁	4 号教学区	19	60
A ₄	学术交流中心	6	10	A ₁₂	3 号教学区	10	10
A ₅	2 号教学区	57	40	A ₁₃	1 号办公区	36	50
A ₆	1 号教学区	38	10	A ₁₄	实验楼	110	90
A ₇	图书馆	18	50	A ₁₅	2 号办公区	105	90
A ₈	2 号食堂	124	100	A ₁₆	2 号宿舍区	220	250

结合上述实际数据,利用 AnyLogic 软件构建校园共享单车仿真系统,其运行界面如图 3 所示。该模型中子系统与实际区域相对应,同时提供实时车辆数据,能够更加直观地反映共享单车供需变化情况。通过设置视图区域,可在运行区、统计区与操作区间进行切换,对部分参数进行调整或激发特定调度事件,这些功能可以为后续日常调度提供依据。例如,当某一分区单车余量下降到预先设定的最低数值时,系统进行计算并提醒工作人员及时从单车使用率低的区域调入车辆,以提高单车整体使用率。

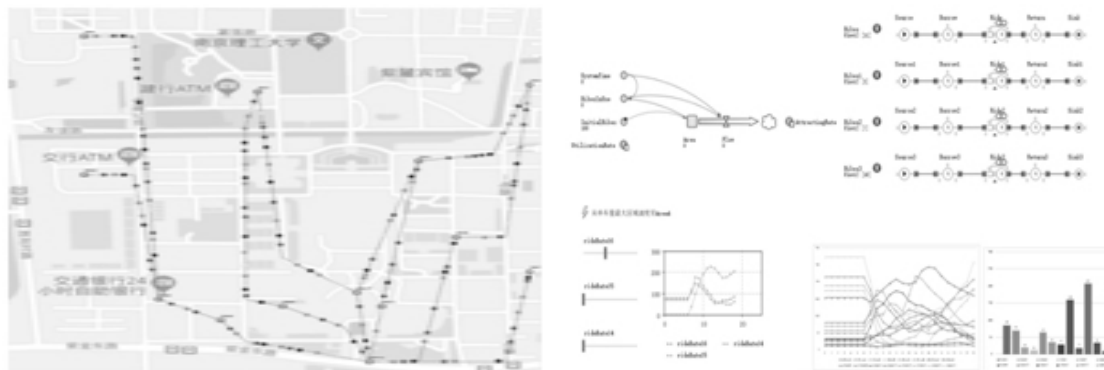


图 3 校园共享单车仿真流动模型

由于部分参数是根据调研情况估计所得,与真实数值必然存在一定偏差,因此需要对仿真模型进行检验与优化。建立相关变量数据集,使用校准 (Calibration) 功能对参数进一步校准优化,可得到更为准确的参数值。模型输出结果交由校园共享单车调度工作人员核实,表明误差处于可接受的范围内,验证了仿真模型的有效性。

2.2 测试结果。设定仿真运行时间为每日 6:00 至次日 00:00,经优化后的参数设置如下:假设用户骑行时平均速度为 12 公里/小时,在区域之间骑行时选择最短路线,并将其作为车辆调度的相对距离;供需变化模块中,各区域单车总量共 1 100 辆,各区域间流动系数 r 服从 $triangular(0.8,1,1.2)$ 分布,其余参数此处省略;用车行为模块中,借车流程 (Borrow) 延迟时间服从 $triangular(0.01,0.05,0.1)$,还车流程 (Return) 延迟时间服从 $triangular(0.005,0.01,0.05)$ 。以系统运行结束后车辆分布情况作为调度前状态,初始投放量作为调度规划目标。将仿真模型在虚拟时间下运行 50 次,可以得到表 3 中各分区运行结果的平均值。与实际调研数值的比较,运行结果误差在 10% 以内。分区单车数量全天变化过程如图 4 所示。

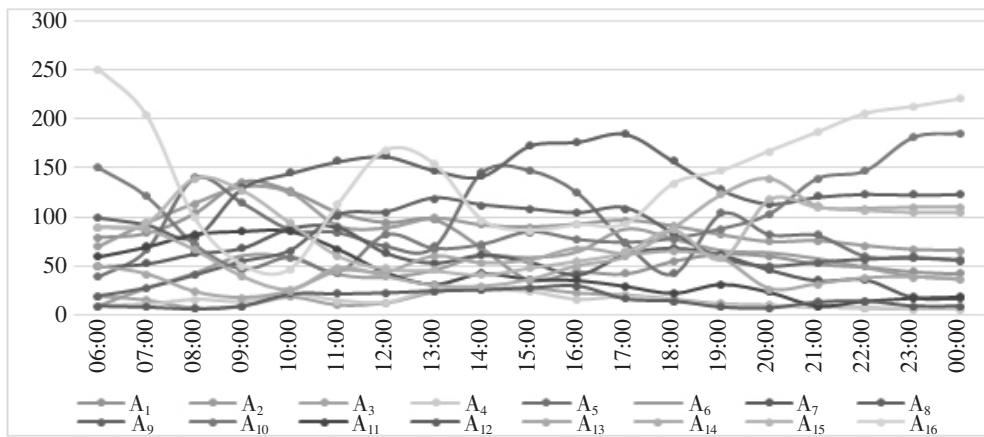


图4 分区共享单车总量变化

由图4可以看出,单车运行在早晚高峰、不同功能的分区间表现出不同的规律,总体上与师生的日常出行一致。其中,学生宿舍区有明显的潮汐现象:在早间用车高峰后明显车辆不足,影响了对后续用车的供应;而19:00后开始有大量车辆堆积且数量持续上升,因此可以考虑提早调出此区域的车辆。此外,各教学区单车变动由于地理位置的差异而不尽相同,其中2号教学区处车辆数量波动最大。通过对分区间借还量的统计,发现早午时段从宿舍区到2号教学区的车辆借还最为频繁。在实时调度的情况下,相比其他停靠数量少的区域,这两个区域应该作为重点调度地点,以解决现有系统中14:00~16:00间大量车辆堆积的问题。

结合流入量流出量统计数据发现,在一些区域单车数量闲置过剩的同时,存在部分区域单车紧缺,不能很好地满足用户需求的情况。如早间宿舍区、午后学生食堂、傍晚时教学区单车使用率最高;而8:00~10:00左右的1号、2号校门,晚间学生食堂平均使用次数低、车辆堆积多。这表明单车在某些区域和时段分配调度有待优化。

对比16个分区的运行结果及次日需求,发现供需并不平衡,需要对车辆分布进行调度重置。将各区域之间的距离、单位运输成本及仿真运行结果、调度目标输入上述优化调度模型,在选择23:00进行调度的情况下,可求解得到表4所示调度方案。此时以下调度方案运输成本最低,为90.29元,总调度数量为177辆。

表4 调度方案

调出区域	调入区域	调度数量	调出区域	调入区域	调度数量
A ₅	A ₄	4	A ₁₀	A ₁₆	17
	A ₇	16		A ₁	25
A ₆	A ₇	9	A ₁₅	A ₁₆	6
	A ₁₁	21		A ₁₆	15
A ₈	A ₁	10	A ₁₄	A ₂	3
	A ₃	13		A ₇	6
A ₉	A ₁₁	21		A ₁₃	11

2.3 优化方案比较。在实际情况中,为了不影响用户的正常使用,共享单车运营方一般选择在夜间进行大规模调度。由于工作人员的人力成本与工作时间有关,在单车使用率最低的深夜进行作业实际上将增加调度成本。根据图4所示单车运行情况,可以观察到在晚高峰结束后,除1号、2号住宿区单车数量有明显增加外,其余分区的单车数量仅有小幅度减少。为了使求解的调度方案更具有实际操作意义,在假设其余车辆全部流入这两个分区的情况下,应用模拟软件分别得到当天20:00至次日01:00调度时单车分布数据,并计算调度成本,结果如图5所示。由此可见,在23:00进行调度所需成本最低,且能够满足次日用车需求。因此对于实际操作来说,选择此阶段进行调度比凌晨时刻调度更加可行。

3 结论

本文以南京理工大学校园区域为例研究共享单车的调度重置优化问题。首先将该区域按用地性质划分为不同子区域,同时

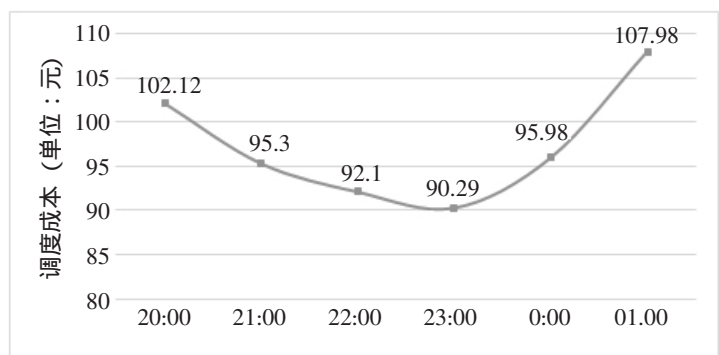


图5 不同时段调度方案成本变化

将一天单车活跃时间划分为 18 个时段, 根据实际调研获得所需的流量、存量、动态变量、表函数等参数数值; 在此基础上, 建立 AnyLogic 仿真模型以模拟校园内单车的流动状况; 进一步地, 将仿真实验结果作为数学优化模型的输入, 建立共享单车重置的整数规划模型并进行求解, 最终得到了较为理想的调度方案。

本文中仿真建模的加入, 完善了对于单车流动状况特性的形象展示, 更好地把握了共享单车分布、流动和调配的特点, 这是现有研究中所没有体现的。同时, 运营成本和调度时间两个因素的考虑也使给出的调度方案可行性更强。当然, 本次研究也存在一些不足之处, 对于实时调度的研究仍然涉及较少。后续可以将模型运行的流动分布图表作为探究实时调度方法的基础, 以进一步寻求提升用户满意度和企业运营效率的调度重置方法。

参考文献:

- [1] Shen Y, Zhang X, Zhao J. Understanding the usage of dockless bike sharing in Singapore[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2018(9):686–700.
- [2] Liu Z, Shen Y, Zhu Y. Inferring Dockless Shared Bike Distribution in New Cities[C]// WSDM'18: proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Web Search and Data Mining Pages, New York, 2018:378–386.
- [3] Ahmed Abdelmoumene Kadri, Imed Kacem, Karim Labadi. A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016,95:41–52.
- [4] Pal A, Zhang Y. Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2017,80:92–116.
- [5] Caggiani L, Camporeale R, Ottomanelli M, et al. A modeling framework for the dynamic management of free-floating bike-sharing systems[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2018,87:159–182.
- [6] Dong Zhang, Chuhan Yu, Jitmitra Desai, et al. A time-space network flow approach to dynamic repositioning in bicycle sharing systems[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2017,103:188–207.
- [7] 王嘉薇, 朱家明, 祁浩宇, 等. 基于 VRP 模型城市共享单车的优化调配研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2018,37(1):81–86.
- [8] 吴满金, 董红召, 刘冬旭, 等. 公共自行车多目标动态调度建模与算法研究[J]. 机电工程, 2015,32(7):1006–1010.
- [9] 中国人工智能学会. 2017 摩拜杯算法挑战赛[EB/OL]. (2017–09–25)[2018–06–28]. <https://www.biendata.com/competition/mobike/>.
- [10] 佚名. 中国共享单车 13 城市用户调查[EB/OL]. (2017–04–30)[2018–07–05]. <http://www.dcci.com.cn/>.
- [11] 徐建闽, 秦筱然, 马莹莹. 公共自行车多层次分区调度方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017,17(1):212–219.

(上接第 55 页) roads; Past, present and future[J]. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances De L'Académie Des Sciences, 2003,236(1):137–139.

- [4] Jiang Y. Traffic Capacity, Speed, and Queue-Discharge Rate of Indiana's Four-Lane Freeway Work Zones[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1999(1):10–17.
- [5] Hidas P. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation[J]. Transportation Research Part C, 2002,10(5):351–371.
- [6] Weng J, Meng Q. Modeling speed-flow relationship and merging behavior in work zone merging areas[J]. Transportation Research Part C, 2011,19(6):985–996.
- [7] Sutton L N, Clark B J, Norwood C R, et al. Global cerebral ischemia in piglets under conditions of mild and deep hypothermia[J]. Stroke, a journal of cerebral circulation, 1991,22(12):1567–1573.
- [8] Al-Kaisy A, Zhou M, Hall F. New insights into freeway capacity at work zones: empirical case study[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2000(1):154–160.
- [9] Kim T, Lovell D J, Hall M, et al. A new methodology to estimate capacity for freeway work zones[Z]. 2001.
- [10] Dixon K, Hummer J, Lorscheider A. Capacity for North Carolina Freeway Work Zones[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1996(1):27–34.
- [11] Leonov Y, Sterz F, Safar P, et al. Mild Cerebral Hypothermia during and after Cardiac Arrest Improves Neurologic Outcome in Dogs[J]. Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism Official Journal of the International Society of Cerebral Blood Flow & Metabolism, 1990,10(1):57–70.
- [12] 任福田. 道路通行能力手册[Z]. 1991.
- [13] 韩宝睿. 高速公路改扩建工程方案研究的关键技术分析[D]. 南京: 东南大学 (硕士学位论文), 2005.
- [14] 张建龙. 高速公路改扩建工程保通方案研究[D]. 长沙: 湖南大学 (硕士学位论文), 2007.
- [15] 杨庆祥. 施工作业对城市道路通行能力的影响分析[J]. 西部交通科技, 2008(5):105–112.
- [16] 陈雅, 邵长桥. 城市快速路施工区通行能力研究[J]. 道路与安全, 2010,10(1):53–56,64.
- [17] 葛婷. 高速公路改扩建施工期间交通组织方案研究[D]. 广州: 华南理工大学 (硕士学位论文), 2012.