

基于预测库存变化率的公共自行车动态调度方法

高 亮¹, 徐 伟^{1,2}

(1. 北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术创新交通运输行业重点实验室, 北京 100044;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 国家铁道试验中心, 北京 100015)

摘 要:为提高公共自行车系统调度效率并降低调度成本,提出基于预测库存变化率的公共自行车动态调度方法。将公共自行车站点类比为库存系统,利用马尔可夫过程平稳分布的性质,预测调度时段各站点的库存变化率,进而预测调度时段末各站点库存率。考虑站点合理库存率区间,根据站点初始库存率和预测库存率,确定需要调度的站点集合。考虑调度车辆到达有调度需求站点的最晚到达时间与调度车辆装载量约束,以调度车辆总行驶距离最短为优化目标,建立优化目标为车辆总行驶距离最短的动态调度模型。利用模拟退火算法求解模型,得到优化调度方案。由于预测了调度时段内站点的库存变化率,因此,在给定的调度区域内,为了保证所有站点的库存率始终维持在合理库存率区间,调度车辆只需要在有调度需求的站点之间执行 1 次调度任务。以波士顿公共自行车系统为例,验证基于预测库存变化率的动态调度方法。结果表明:基于预测库存变化率的动态调度方法,在给定的各个调度区域内,最多可缩短调度车辆 35.58% 的行驶距离;若完成系统全部调度任务时,调度车辆总行驶距离可缩短 18.53%;与基于滚动时域的动态调度方法相比,基于预测库存变化率的动态调度方法,不需要分段检测系统运行状态,避免了对调度方案的被动调整,提高了编制和执行效率。

关键词:交通工程;动态调度方法;混合整数规划;公共自行车系统;库存变化率

中图分类号:U492.22

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.06.012

A dynamic scheduling method via predicted inventory variation rate for public bicycle

GAO Liang¹, XU Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. National Railway Track Test Center,

China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100015, China)

Abstract: To improve the efficiency and reduce the scheduling cost of public bicycle system, a dynamic scheduling scheme based on the predicted inventory variation rate was proposed. Each public bicycle station was regarded as an inventory system, the inventory variation rate of each station during the scheduling period and the inventory rate of each station at the end of the scheduling period were predicted based on the stationary distribution of Markov Process. Considering the reasonable interval of inventory rate of each station, the stations which should be

rebalanced were determined based on the initial inventory rate and the predicted inventory rate of each station. The dynamic scheduling problem (DSP) was addressed, in which a capacitated dispatching vehicle was employed to redistribute the bikes in terms of the latest arrival time of each station with the objective of minimizing total scheduling distance. The DSP model was solved by the Simulated Annealing Algorithm, and got the optimal scheduling scheme. Because the inventory variation rate of each station were predicted, for a given scheduling area, the dispatching vehicle cruised only once, which could enable the inventory rate of each station to stay in a reasonable interval from the time it was served to the end of scheduling period. Bluebikes (Boston, MA, USA) public bicycle system was taken as an example, the dynamic scheduling scheme based on predicted inventory variation rate was validated. The results show that the dynamic scheduling scheme based on the predicted inventory variation rate could at most shorten the cruise distance of the dispatching vehicle by 35.58% among all scheduling areas, and could shorten the total cruise distance of all dispatching vehicles by 18.53% for the whole Bluebikes public bicycle system. Compared with the rolling scheduling horizon, the proposed scheme avoids the passive adjustment of the scheduling scheme without the piecewise detection of the system operation state, and improves the efficiency of the generation and execution of the scheduling scheme. 3 tabs, 4 figs, 26 refs.

Key words: traffic engineering; dynamic scheduling; mixed integer programming; public bicycle system; inventory variation rate

0 引 言

近年来,公共自行车系统在世界范围得到广泛应用,主流公共自行车系统可分为有锁桩式系统(docking bike-sharing system)和无锁桩式系统(dockless bike-sharing system)。有锁桩式系统通过站点提供租赁服务,无锁桩式系统通过设置电子围栏实现规范化管理。在公共自行车系统中,用户的出行需求呈现时空分布不均的特点,随着系统规模的扩大与用户数量的增加,“借车难,还车难”的问题逐渐显现。在成本约束下,最大限度地满足用户需求,成为运营者的首要目标。科学高效地安排调度车辆对系统进行再平衡(rebalancing)是解决此类问题的关键。国内外关于公共自行车系统的调度优化研究成果可分为 3 个方面:调度需求预测、调度区域划分和调度路径优化^[1]。

有些研究者利用数理统计方法预测了公共自行车调度需求。Crisostomi 等根据系统的借还车特点,基于马尔科夫链和站点转移概率,建立了站点的借还车需求预测模型,该模型重点从宏观角度描述公共自行车系统运营过程,进而预测公共自行车调度需求^[2]。Raviv 等利用连续马尔科夫链,建立了考虑用户满意度的库存优化模型,其假设每个站点是独立的,忽略站点之间的相互影响,并从系统层面

确定站点自行车库存量的优化调度需求量,通过实际数据验证表明,该模型可快速获得近似解,能适应实际系统运营的时间约束^[3]。Gao 等利用稳态马尔科夫过程预测了站点的调度需求,有效提高了调度需求的计算效率,对于快速确定实际公共自行车系统的调度需求量具有一定的实际应用价值^[4]。Calafiore 等应用排队论方法,预测了公共自行车系统的出行需求,并在意大利 Turin 公共自行车系统“ToBike”投入运营^[5]。回归分析方法也是预测调度需求的常用方法。Faghih-Imani 等根据线性混合回归模型,探讨了天气、土地利用、建筑环境等条件对站点借还车的影响,并预测了站点的借还车需求^[6]。吴满金基于随机效用理论,建立了借还需求预测的 Multi-Logit 模型,分析公共自行车在公共交通中的分担率,并将站点的潜在租赁需求引入到借还车需求预测中,该方法可以提高租赁需求的预测精度^[7]。徐叶冉子等将时间序列模型与圆分布法相结合,预测了站点用车高峰时段的借车需求,该预测方法可以明显缓解高峰时段调度不及时的问题^[8]。随着大数据分析技术的兴起,近几年,机器学习相关分析方法也被应用于预测站点调度需求。Han 等提出了一种基于随机森林和时空聚类的公共自行车系统各站点租赁需求预测方法,并探讨了通过用户激励机制使得自行车的空间分布趋于平衡的方法,

结果表明,动态定价激励模型可以引导用户的借还车行为,使系统达到借还车需求的空间平衡^[9]。Li 等利用梯度回归树 (gradient boosting regression tree) 从系统整体层面预测了自行车借还车需求的空间分布情况,并通过与 9 种已有方法预测结果对比验证表明,其预测精度可以提高约 3%^[10]。Liu 等基于反向传播神经网络 (back-propagation neural network) 方法预测了站点的库存率,进而预测了使各站点满足租赁需求的短时再平衡调度需求量^[11]。

基于系统运营特性借助聚类法划分调度区域,可以较好地达到控制调度任务量的目的,成为目前公共自行车系统调度区域划分的常用方法。董红召等借助站点流量间相关性强度,提出基于关联规则的公共自行车调度区域聚类划分方法,其方法兼顾城市公共自行车系统租赁点的空间和非空间属性,能为公共自行车实时调度提供一种科学有效的调度区域划分方案^[12]。徐建闽等提出以上层调度区域、调度小区和站点为主的多层次分区调度方法,在详细分析了各层次分区流程及相关参数的基础上,提出结合虚拟小区与有时间窗的多目标优化调度模型解决区间调度问题,并且建立了小区内调度的最优路径模型,形成区间灵活调度,区内路径固定的半确定调度体系;该方法在保证高峰期及时调度,减少不必要的绕行和拥堵时间,提高调度效率,减少盲目性等方面具有重要意义^[13]。Almannaa 等将 Gale-Shapley 算法与 K-Median 算法结合,建立了根据站点库存率的聚类算法生成调度区域的方法,并将聚类问题转化为形心与数据点之间的匹配 (matching) 问题进行求解,进而将其转化为一个多目标规划问题,为调度区域划分过程提供了数学保障,提高了问题求解精度^[14]。朱金山等基于 SimRank 提出关联关系站点聚类算法 (station cluster based SimRank, SCSR),该算法将具有类似关联关系的站点聚成一类,重点考虑了城市公共自行车系统本身的空间拓扑网络特征^[15]。

调度路径优化是优化的核心问题,优化目标主要分为 2 类。一类是,以降低系统的调度成本为优化目标^[16-17],从运营者角度进行的优化,主要考虑调度车辆的油耗成本,调度时间成本,自行车搬运与装卸成本。Dell'Amico 等以总调度成本最小为优化目标,将自行车再平衡问题表述为一个单商品装卸调度车容量有限的车辆路径问题,并建立了 4 种不同的混合整数规划模型,研究表明,模型 3 的结果最优,且最符合实际情况^[16]。Erdogan 等将混合整

数规划问题中的决策变量转化为二值变量,进而利用枚举搜索算法找到解稳定域中组合 Benders 的解分割^[17]。另一类是,降低调度成本和提高用户满意度建立多目标优化模型^[18-19],该类优化模型兼顾运营者成本和用户效用两方面进行问题优化。其中,用户效用常量化为用户等待时间,或基于模糊时间窗建立用户满意度函数,实现定量计算。Li 等不仅考虑系统调度总成本最小的优化目标,还借助惩罚因子将用户满意度引入模型之中,研究了多种类型公共自行车的静态调度优化问题,并基于组合理论和混合遗传算法提出了一种高效率的模型求解算法,该求解算法的计算效率对惩罚因子敏感依赖性高,单位惩罚强度对运营决策有较大影响,值得后续深入研究^[18]。Szeto 等同样以调度成本最小化和用户满意度为优化目标,借鉴化学反应优化 (CRO) 理论,提出了一种新的公共自行车静态调度优化方法,通过限定邻居节点集合,缩小了解空间范围,进而得到了一种高效率、高精度的求解方案^[19]。

公共自行车系统调度路径优化可分为静态调度和动态调度。静态调度,常在夜间或平峰时段执行,忽略调度过程中用户的借还车影响,该类型调度问题可归纳为车辆路径问题 (VRP)^[1],可建立 0-1 型混合整数规划 (mixed integer programming, MIP) 模型。动态调度,常在白天的高峰时段执行,会考虑调度时段内站点库存量的变化。滚动时域 (rolling horizon) 方法是常见的动态调度方法,它将动态调度问题转化为多个时间连续的静态调度问题,其本质上是多个局部优化方案的叠加。Shui 等同时考虑用户需求无法满足的惩罚、运输车辆燃油成本与二氧化碳排放惩罚,建立了公共自行车动态调度优化模型,并借助滚动时域方法求解调度路径优化子问题,研究发现,滚动时域时间片大小对总成本影响较大,并且运营公司在满足用户需求和减少运输车辆运行成本之前,需权衡利弊^[20]。

本文提出基于预测库存变化率的公共自行车动态调度方法,其核心环节是计算站点的库存变化率,预测站点在调度时段末的库存率,并生成调度时段的优化调度方案。相对于滚动时域的动态调度优化方法,本文方法得到的调度方案,不仅求解效率明显提高,还可以保证全系统全时段各站点始终满足用户需求,且运营方的总体运营成本相对降低。

1 站点调度管理属性

有锁桩式公共自行车系统通过站点为用户提供

借还车服务,站点可类比为库存系统^[3,21],站点主要管理调度相关属性的计算方法如下。

1.1 库存变化率

时段 T 内站点 i 的累计借车数为 L_i 、累计还车数为 R_i ; 平均借车率为 $\lambda_i = L_i/T$; 平均还车率为 $\mu_i = R_i/T$ 。站点 i 库存变化率 $\delta_i = \lambda_i - \mu_i$ 。 δ_i 定量表示站点的借还车趋势:正值越大,借车需求越明显;负值越大,还车需求越明显。

公共自行车系统可根据历史运营数据,预测调度时段内站点库存变化率,具体方法如下。

首先,分时段统计系统运行历史数据,得到时段 T 内,用户出行 OD 矩阵 $\mathbf{F} = (f_{ij})_{n \times n}$ 。其中: f_{ij} 为站点 i 至站点 j 的出行量; n 为站点数。可得到借车转移概率矩阵 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = (p_{ij})_{n \times n} = \left[\frac{f_{ij}}{\sum_{k=1}^n f_{ik}} \right]_{n \times n} \quad (1)$$

式中: p_{ij} 为站点 i 的自行车归还到站点 j 的概率。

相应地,还车转移概率矩阵 \mathbf{Q} 为

$$\mathbf{Q} = (q_{ij})_{n \times n} = \left[\frac{f_{ij}}{\sum_{k=1}^n f_{kj}} \right]_{n \times n} \quad (2)$$

式中: q_{ij} 为还到站点 j 的自行车之中借自站点 i 的概率。

其次,假设站点借还车的动态演化过程是平稳马尔科夫过程^[2],则根据马尔科夫过程平稳分布^[22]的性质,可得到

$$\boldsymbol{\varphi}_l^T = \boldsymbol{\varphi}_l^T \mathbf{P} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}_l$ 为时段 T 内的借车稳态概率向量。

式(3)表明当系统运行状态进入稳态马尔科夫过程后,在借车转移概率矩阵 \mathbf{P} 的作用下,借车稳态概率向量 $\boldsymbol{\varphi}_l$ 不再发生变化。

式(3)变形整理,可得齐次线性方程组

$$(\mathbf{E} - \mathbf{P}^T) \boldsymbol{\varphi}_l = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中: \mathbf{E} 为 \mathbf{P} 同阶单位矩阵, $\mathbf{E} - \mathbf{P}^T$ 为奇异矩阵,方程组存在满足条件的唯一解,即为借车稳态概率向量。

同理,对于还车稳态概率向量 $\boldsymbol{\varphi}_r$ 有

$$\boldsymbol{\varphi}_r = \mathbf{Q} \boldsymbol{\varphi}_r \quad (5)$$

式(5)变形整理,可得齐次线性方程组

$$(\mathbf{E} - \mathbf{Q}) \boldsymbol{\varphi}_r = \mathbf{0} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E} - \mathbf{Q}$ 为奇异矩阵, $\boldsymbol{\varphi}_r$ 为方程组唯一解,即为还车稳态概率向量。

最后,计算系统在 T 时段的点 i 的累计借车数 L_i 、累计还车数 R_i ,从而得到库存变化率

$$\delta_i = (L_i - R_i)/T \quad (7)$$

1.2 预测库存率

将站点 i 的锁车桩数量定义为站点容量 C_i ,站点 i 在时刻 t 库存量为 $B_i(t)$,可得库存率 $S_i(t) = B_i(t)/C_i$ 。

调度时段 T 的起始时刻 t_0 ,则结束时刻为 $t_0 + T$,记站点 i 的初始库存率为 $S_i(t_0)$,根据下式预测 $(t_0 + T)$ 时刻站点 i 的库存率,即

$$S_i(t_0 + T) = S_i(t_0) - \delta_i T / C_i \quad (8)$$

在调度时段 T 内,需要根据合理库存率筛选出有调度需求的站点。参考已有文献^[21,23-24]设置站点合理库存率区间。最小站点合理库存率 $S_{\min} = 0.2$,最大站点合理库存率 $S_{\max} = 0.8$ 。得到站点合理库存率区间为 $[S_{\min}, S_{\max}]$ 。只要 $S_i(t_0)$ 或 $S_i(t_0 + T)$ 超出合理区间为 $[S_{\min}, S_{\max}]$,则站点 i 被纳入调度任务。记调度车辆到达站点 i 的时刻为 t_i 。则调度优化的库存率目标是 $S_{\min} < S_i(t) < S_{\max}$, $t \in [t_i, t_0 + T]$ 。

1.3 调度需求量

根据站点 i 的库存变化率可知站点 i 在 t_i 时刻的目标库存量 $\hat{B}_i(t_i)$ 如下

$$\hat{B}_i(t_i) = \left(\frac{S_{\max} - S_{\min}}{\pi} \arctan(\delta_i(t_0 + T - t_i)) + \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \right) C_i \quad (9)$$

站点 i 的调度需求量 q_i 如下

$$q_i = \hat{B}_i(t_i) - (B_i(t_0) - \delta_i(t_i - t_0)) \quad (10)$$

式中: $B_i(t_0)$ 为初始库存量; $\delta_i(t_i - t_0)$ 为调度过程中用户借(还)车行为对站点库存量的影响。

1.4 最晚到达时刻

为避免空桩或满桩现象的发生,设定调度车辆到达站点 i 的最晚到达时刻为 D_i 。最晚到达时刻 D_i 与库存变化率 δ_i 满足

$$D_i = \begin{cases} \min\left(t_0 + \frac{B_i(t_0)}{\delta_i}, t_0 + T\right) & \delta_i > 0 \\ t_0 + T & \delta_i = 0 \\ \min\left(t_0 + \frac{B_i(t_0) - C_i}{\delta_i}, t_0 + T\right) & \delta_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

2 动态调度方法

公共自行车系统的运营范围广,服务时间长,为避免调度滞后,动态调度时采用分区域、分时段调度策略^[13]。本文在给定的调度时段和调度区域内,研究基于预测库存变化率的动态调度优化方法。调度区域设置一个调度中心,配备 1 辆调度车。

给定的调度区域内,调度方案编制过程如图 1 所示。以最晚到达时刻为需求,根据调度车辆服务各站点的先后顺序,计算站点的调度需求量。在给定的调度区域内,对各站点进行一轮自行车调度服务,使所有站点的库存率处于合理库存率区间。

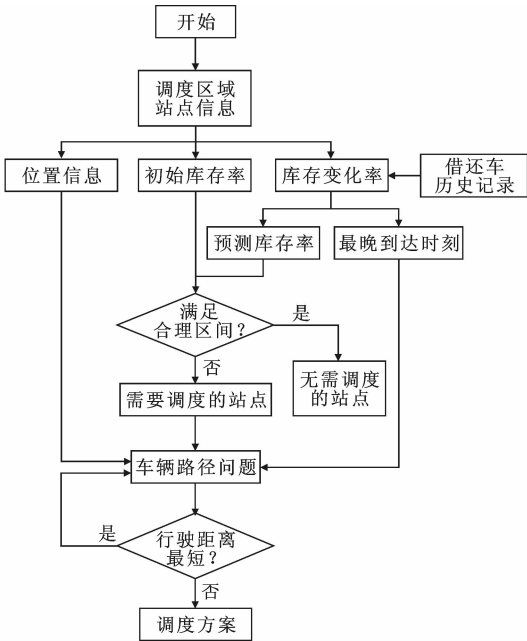


图 1 调度方案编制流程

Fig. 1 Flows of scheduling scheme designing

调度方案编制过程的核心问题,是一个车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)。本文建立 0-1 型非线性整数规划模型^[16]如下

$$\min Z = \sum_{i \neq j \in N_0} d_{ij} x_{ij} + M \sum_{i \in N} \max(t_i - D_i, 0) \quad (12)$$

s. t.

$$t_j \geq t_i + t_w |q_i| + t_{ij} x_{ij} + M(x_{ij} - 1) \quad \forall i \neq j \in N_0 \quad (13)$$

$$\sum_{j \neq i \in N_0} x_{ji} = \sum_{j \neq i \in N_0} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (14)$$

$$\sum_{j \neq i \in N_0} t_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in N} t_w |q_i| \leq T \quad (15)$$

$$\sum_{i \neq j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq N, 2 \leq |S| \leq |N| \quad (16)$$

$$0 \leq C_i - \sum_{j \neq i \in N_0} x_{ij} q_j \leq C \quad \forall i \in N_0 \quad (17)$$

$$0 \leq C_0 \leq C \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \neq j \in N_0 \quad (19)$$

式中: N 为需要调度的站点的集合; S 是 N 的非空子集,至少包含 2 个元素,最大等于集合 N ; N_0 为需要调度的站点集合与调度中心的并集; C_0 为调度车辆的初始装载量; C_i 为调度车辆离开站点 i

时装载的自行车数量; C 为调度车辆的装载量限制; t_{ij} 为站点 i 到站点 j 的调度车行驶时间; d_{ij} 为站点 i 到站点 j 的行驶距离; t_w 为调度车辆装载或卸载 1 辆自行车的时间; M 为惩罚系数; x_{ij} 为决策变量,若调度车从站点 i 开往站点 j 取值为 1,否则,取值为 0。

其中,式(12)目标函数 Z 包含 2 个部分,第 1 部分是调度车辆的行驶距离,第 2 部分是调度车辆迟到惩罚;式(13)为站点访问顺序限制;式(14)为流量约束,一个站点仅被访问 1 次,当 $i=0$ 时,表示车辆从调度中心出发,最终返回调度中心;式(15)为调度时长限制;式(16)为子回路消除约束(subtour elimination)^[25],排除包含多条闭合回路的组合解;式(17)为调度车辆装载量约束;式(18)为车辆的初始装载量约束;式(19)为 0-1 整数约束。本文模型已充分考虑了预测库存变化率的信息。

3 算例分析

以波士顿公共自行车系统工作日晚高峰(17:00~18:00)时段为例,验证基于预测库存变化率的动态调度方法。历史运营数据包括:行程时间、行程开始日期时间、行程结束日期时间、行程开始站点名称与编号、行程结束站点名称与编号、自行车编号、用户信息(类型、生日、性别)。公共自行车系统站点基础数据包括:名称、经纬度坐标。数据不包含工作人员维护系统时造成的自行车移动、搬运的数据。经过现场调研,波士顿有极少量无锁桩式公共自行车(即共享单车)。由于数量极少,对有锁桩式公共自行车系统运营的影响可以忽略不计。本文所使用的数据日期时间段是 2017 年 1 月 1 日~2017 年 12 月 31 日。

根据最大生成星^[21]判断调度区域的任务量约束,借助扫描算法^[26]与 2-均值聚类算法,对波士顿公共自行车系统进行调度区域划分,得到 17 个调度区域如图 2 所示,相关站点信息见表 1。

以 4 号调度区域为例,展示调度方案编制过程。4 号调度区域内所有站点的状态如表 2 所示。采用模拟退火算法求解调度方案编制问题。

图 3 给出了基于预测库存变化率的动态调度方案。图 3 中的序号为站点编号,0 表示调度中心。调度路径总长度为 2 626.83 m,具体调度方案为:0→39→142→49→25→0。

为了验证本文方法的合理性,图 4 给出了基于滚动时域的动态调度方案^[11]。调度路径总长度为

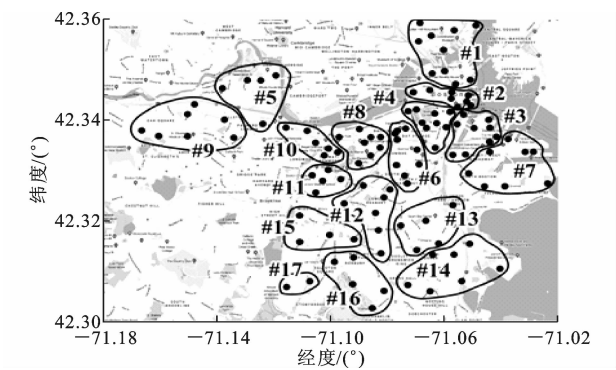


图 2 调度区域划分结果

Fig. 2 Results of scheduling regions delimitation

表 1 调度区域基本信息

Tab. 1 Basic informations of scheduling regions

区域编号	站点数量	站点编号
1	10	30,37,75,119,28,88,84,180,159,161
2	8	33,38,141,10,13,34,306,50
3	9	21,14,307,54,182,12,53,140,55
4	9	49,39,71,25,32,44,110,48,142
5	5	7,19,139,5,31
6	9	40,124,26,6,304,15,16,29,3
7	8	109,136,111,125,126,176,153,151
8	8	11,45,51,42,43,23,305,36
9	7	27,308,197,56,165,198,164
10	6	35,112,22,9,300,309
11	5	150,303,1,4,20
12	7	46,190,41,2,17,186,194
13	5	103,128,96,189,118
14	7	157,120,83,193,195,163,82
15	4	187,121,149,115
16	5	191,116,160,192,152
17	2	123,114

表 2 区域内站点的状态数据(调度前)

Tab. 2 Status data of stations in scheduling regions (before schedule)

站点编号	站点容量/辆	初始库存量/辆	库存变化率/(辆·h ⁻¹)
49	15	1	3
39	19	2	1
71	15	10	2
25	23	5	6
32	22	9	4
44	15	10	1
110	15	6	-1
48	15	4	-1
142	15	11	-3

4 077.43 m,包含 3 条调度线路。线路 1:0→39→49→0。线路 2:0→25→0。线路 3:0→142→0。具体调度方案为:0→39→49→0→25→0→142→0。

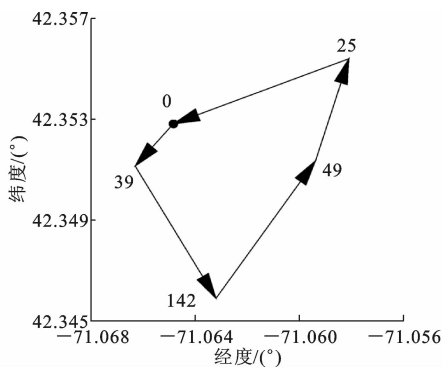


图 3 基于预测库存变化率的调度方案

Fig. 3 Scheduling scheme based on predicted inventory variation rate

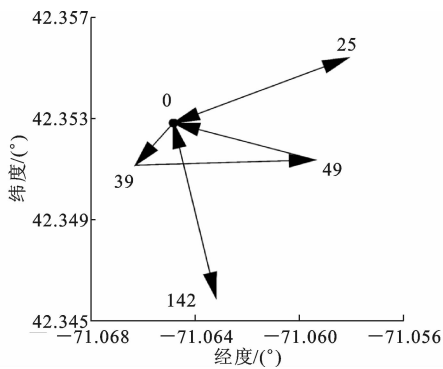


图 4 基于滚动时域的调度方案

Fig. 4 Scheduling scheme based on rolling horizon

表 3 为 2 种方法的调度方案对比。基于预测库存变化率的动态调度方法与基于滚动时域的动态调度方法相比,17 个调度区域中有 14 个调度区域调度成本显著降低,最大可降低 35.58%,系统总调度成本降低 18.53%。分析各调度区域的调度路径可知,在给定的调度时段内,基于预测库存变化率的调度方案,克服了基于滚动时域的调度方案中需要多次访问调度中心的缺点,实现了调度方案的优化。

4 结 语

(1)本文提出基于预测库存变化率的公共自行车动态调度方法。将站点类比为库存系统,综合考虑站点的调度需求和车辆的调度路线。求解 0-1 型非线性整数规划模型,得到优化调度方案。以波士顿公共自行车系统为例验证本文方法,研究表明,基于预测库存变化率的动态调度方法与基于滚动时域的动态调度方法相比,在提高调度效率的同时,显著降低了系统的调度成本。该方法适用于白天高峰时段的动态调度情形,可作为公共自行车运营企业编制合理调度方案的参考。

(2)公共自行车系统发展到今天,是一个有锁桩

表 3 调度方案对比

Tab. 3 Comparisons of scheduling schemes

区域编号	预测库存变化率法		滚动时域法		减少比率/%
	方案	路径 长度/m	方案	路径 长度/m	
1	0→88→180→28→30→75→119→84→0	5514.65	0→84→119→75→30→28→180→88→0→28→0	6674.36	17.38
2	0→33→10→38→0	1692.97	0→38→33→10→0→38→0	2156.80	21.51
3	0→55→14→54→0	1517.44	0→54→0→14→0→55→0	2202.77	31.11
4	0→39→142→49→25→0	2626.83	0→39→49→0→25→0→142→0	4077.43	35.58
5	0→19→7→139→5→0	3299.22	0→7→19→5→0→139→0	3923.06	15.90
6	0→6→15→3→16→304→40→124→26→0	4567.43	0→3→304→40→124→26→0→6→0→16→0→15→0	6462.91	29.33
7	0→151→136→125→126→176→0	6109.07	0→136→126→176→151→0→125→0→126→0	8667.4	29.52
8	0→23→43→42→51→36→0	3105.70	0→42→43→23→36→0→51→0	3688.61	15.80
9	0→197→27→56→165→164→0	5308.89	0→27→197→164→155→0→56→0	5843.93	9.16
10	0→300→309→22→112→0	3056.51	0→300→309→22→112→0	3056.51	0.00
11	0→1→20→303→0	1943.07	0→303→20→0→1→0	2237.95	13.18
12	0→2→190→46→0	2090.88	0→46→190→0→2→0	2678.04	21.93
13	0→103→118→189→0	3578.67	0→118→189→0→103→0	3950.26	9.41
14	0→163→82→0	3066.07	0→163→0→82→0	3806.81	19.46
15	0→121→187→0	1952.92	0→187→0→121→0	2480.22	21.26
16	0→192→160→116→0	4040.32	0→192→160→116→0	4040.32	0.00
17	0→114→123→0	1372.87	0→114→123→0	1372.87	0.00
总计		54 843.51		67 320.25	18.53

(站)式公共自行车系统与无锁桩(站)式公共自行车(共享单车)系统共存的状态,二者各有优缺点。

目前,关于无锁桩式公共自行车系统再平衡调度优化研究成果都是通过识别虚拟站点,将无锁桩式公共自行车系统调度优化问题转化为基于虚拟站点的有锁桩式公共自行车系统的调度优化问题。因此,本文可为无锁桩式公共自行车系统再平衡调度优化问题研究提供重要的模型和方法基础。

(3)在本文工作基础上,后续有 2 个方向的研究工作可以深入探讨:将调度时段前系统的运行状态纳入库存变化率的预测过程中,以进一步提高库存变化率的预测精度;放松调度时段内库存变化率保持不变的限制条件,使得优化模型描述的系统运营情景更接近现实,有利于未来将优化调度方法应用于实际公共自行车系统的动态调度管理实践中。这 2 个方面的研究,都将提高调度时段内预测库存变化率的实时性和精确性,使得公共自行车系统的动态调度成本进一步降低,并提高对实际调度管理的适用性。

参考文献:

References:

[1] FISHMAN E. Bikeshare: A review of recent literature

[J]. Transport Reviews, 2016, 36(1): 92-113.

[2] CRISOSTOMI E, FAIZRAHNEMOON M, SCHLOTE A, et al. A Markov-chain based model for a bike-sharing system[C]//IEEE. Proceedings of the International Conference on Connected Vehicles and Expo. New York: IEEE, 2015: 367-372.

[3] RAVIV T, KOLKA O. Optimal inventory management of a bike-sharing station[J]. IIE Transactions, 2013, 45 (10): 1077-1093.

[4] GAO L, XU W, DUAN Y. Dynamic scheduling based on predicted inventory variation rate for public bicycle system[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 1-11.

[5] CALAFIORE G C, PORTIGLIOTTI F, RIZZO A. A network model for an urban bike sharing system[J]. IFAC Papers OnLine, 2017, 50(1): 15633-15638.

[6] FAGHIH-IMANI A, ELURU N, EL-GENEIDY A M, et al. How land-use and urban form impact bicycle flows: Evidence from the bicycle-sharing system (BIXI) in Montreal[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 41: 306-314.

[7] 吴满金. 公共自行车系统自然租赁需求预测与多目标调度方法[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.

WU Man-jin. Evaluation on natural ride demand and dynamic model with multi-object for public bicycle re-

- balancing problem[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [8] 徐叶冉子, 沈瑾. 基于圆分布法和时间序列模型的公共自行车需求量分析[J]. 工业工程, 2014, 17(2): 55-63.
- XUYE Ran-zi, SHEN Jin. Demand analysis of public bicycle system based on circular distribution method and time series model [J]. Industrial Engineering Journal, 2014, 17(2): 55-63.
- [9] HAN X, CHONG Y, HUANGFU Q. Shared bicycle scheduling model based on price incentive mechanism [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2018: 3713254. [2019-04-03]. <https://doi.org/10.1155/2018/3713254>.
- [10] LI Y, ZHENG Y, ZHANG H, et al. Traffic prediction in a bike-sharing system[C]//ACM. Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM, 2015: 17-33.
- [11] LIU D, DONG H, LI T, et al. Vehicle scheduling approach and its practice to optimise public bicycle redistribution in Hangzhou[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(8): 976-985.
- [12] 董红召, 史彩霞, 陈宁, 等. 基于关联规则的公共自行车调度区域聚类划分[J]. 科技通报, 2013, 29(9): 209-212.
- DONG Hong-zhao, SHI Cai-xia, CHEN Ning, et al. Clustering division of public bicycle scheduling regional based on association rules[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(9): 209-212.
- [13] 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.
- XU Jian-min, QIN Xiao-ran, MA Ying-ying. Public bicycle multilevel partition scheduling method[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 212-219.
- [14] ALMANNAA M H, ELHENAWY M, GHANEM A, et al. Network-wide bike availability clustering using the college admission algorithm: A case study of San Francisco bay area[C]//IEEE. Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). New York: IEEE, 2017: 580-585.
- [15] 朱金山, 刘良旭, 周超兰, 等. 基于 SimRank 的公共自行车站点聚类算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(4): 12-16.
- ZHU Jin-shan, LIU Liang-xu, ZHOU Chao-lan, et al. Public bike station clustering algorithm based on SimRank[J]. Computer Engineering, 2018, 44(4): 12-16.
- [16] DELL'AMICO M, HADJICOSTANTINO E, IORI M, et al. The bike sharing rebalancing problem: Mathematical formulations and benchmark instances [J]. Omega, 2014, 45(2): 7-19.
- [17] ERDOGAN G, BATTARRA M, CALVO R W. An exact algorithm for the static rebalancing problem arising in bicycle sharing systems[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 245(3): 667-679.
- [18] LI Y F, SZETO W Y, LONG J C, et al. A multiple type bike repositioning problem [J]. Transportation Research Part B, 2016, 90: 263-278.
- [19] SZETO W Y, LIU Y, HO S C. Chemical reaction optimization for solving a static bike repositioning problem[J]. Transportation Research Part D, 2016, 47: 104-135.
- [20] SHUI C S, SZETO W Y. Dynamic green bike repositioning problem — A hybrid rolling horizon artificial bee colony algorithm approach [J]. Transportation Research Part D, 2018, 60: 119-136.
- [21] SCHUIJBROEK J, HAMPSHIRE R C, HOEVE W J. Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(3): 992-1004.
- [22] GAGNIUC P A. Markov chains: From theory to implementation and experimentation [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [23] 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.
- WU Man-jin, DONG Hong-zhao, LIU Dong-xu, et al. Research on the dynamic model with multi-objective and algorithm for public bicycle rebalancing problem [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2015, 32(7): 1006-1010.
- [24] KADRI A A, KACEM I, LABADI K. A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 95: 41-52.
- [25] MILLER C E, TUCKER A W, ZEMLIN R A. Integer programming formulation of traveling salesman problems[J]. Journal of the ACM, 1960, 7(4): 326-329.
- [26] GILLET B, MILLER L. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem [J]. Operations Research, 1974, 22(2): 340-349.