
基于排队网络的共享单车坏车运维建模与优化

郭忠玉（上海交通大学 安泰经济管理学院，上海 200240）

【摘要】运行过程中不断产生的坏车是当前共享单车运营面临的一个重要问题。研究针对坏车进行的回收、维修和投放过程怎样影响系统、如何解决相应的决策问题具有重要意义。本文考虑共享单车批量回收、集中维修和批量投放的运行特点，构建封闭排队网络模型，基于连续时间马尔可夫过程的长程稳态和蒙特卡洛仿真方法分析共享单车系统的运维过程对系统性能表现的影响。进一步，在可分配资源有限的约束下，决策维修能力和对应回收和投放的运载能力之间的最优配置。针对解空间有限、离散的特征，结合Ranking and Selection算法，以最小化服务顾客的损失率为目标进行决策。研究发现，提升维修和运载车的运行速率或数量均可以改善系统性能表现，但存在边际递减效应。当系统整体运行能力有限时，增加运载车能更有效地改善系统表现。本文所采用的算法可以有效地选择出最优或接近最优的系统设置。

关键词：共享单车；坏车运维；排队网络

中图分类号：D 605 **文献标志码：**A

Maintenance analysis of Sharing-Bike Based on Queueing Network

Zhongyu Guo

(Antai College of Management and Economics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai
200240, China)

【Abstract】The operation and maintenance of the broken car in the shared bicycle system mainly includes three processes: recollecting, repairing and releasing. With the operating characteristics of batch recycling, centralized maintenance and batch delivery considered, a queueing network model

is constructed. and calculate the system performance parameters through the state transition equation and simulation of the Markov process to study the system. Then determine the allocation of resources in the system between the maintenance center and the recovery and release of vehicles, under the constraint of limited total resources. In view of the limited and discrete features of the solution space, we adopt a Ranking and Selection algorithm, to choose the optimal or near optimal setting with the goal of minimizing the loss rate of customers. We have found that increasing the operating speed or number of maintenance and delivery vehicles can improve system performance, but there is a marginal diminishing effect. When the overall operating capacity of the system is limited, adding trucks can more effectively improve system performance. When the gap between maintenance and delivery capabilities is small, the system's service capabilities are stronger. At last, we demonstrate the validation that algorithm adopted in this paper can effectively select a good system arrangement.

Key words: Sharing Bike; Maintainance; Queueing Network; Simulation

1 引言

共享单车因其便捷性，已成为人们日常通勤的重要方式。根据交通运输部公布的数据，截至 2019 年 8 月底，我国互联网租赁自行车共有 1950 万辆，覆盖全国 360 个城市，注册用户数超过 3 亿人次，日均订单数达到 4700 万单 [24]。十八大的召开，让共享经济在未来经济发展中担任了更加重要的角色。但单车的损坏依然是一个令使用者不快、令运营者头痛的问题。这个问题从共享单车借助移动互联网的浪潮，从传统的有桩模式演进成无桩模式，并迅速遍布中国开始，就一直是一个管理上的难题。根据企鹅智库 2018 年发布的《共享单车数据报告：解读摩拜 ofo 们的用户与未来》中显示，ofo 用户对于共享单车的不满体验中，想骑的时候没有车子的比例高达 55.2%、往返需求难以同时满足的比例是 41.4%。并且单车中上报车辆故障的比例为 39.3%。

抛弃了传统的固定车桩的模式，无桩共享单车（后文以共享单车专指无桩模式）极大地方便了用户的使用，用户规模随之扩大。当需求被创造，新的市场被打开。在共享单车行业方兴之时，面对过百亿的年市场规模，各路资本和创业者大量涌入。为了快速占据市场份额，各家采用典型互联网打法，烧钱铺量。分散的模式下，用户最大的不满是难以找到车，各家不断投入更多的单车来尽可能保证用户体验。但是共享单车的成本不低 [25]，单价从数百至数千元不等。头部单车企业数百万辆的投放量意味着动辄数十亿的投入。与此同时，共享单车的服务过程中存在大量损坏情况，一旦损坏即无法服务顾客。需要进行回收、维修和重新投放。这一过程需要大量的人力资源和零件损耗成本。

这样的商业模式，让极高的固定资产投入和运维成本成为共享单车企业的沉重负担，过量的单车也对城市治理提出巨大挑战。随着政策的出台和行业竞争程度的渐趋稳定，当前单车系统的运维成为了各运营商更加关注的问题。单车的损坏不仅影响用户体验；对单车的运营公司而言，损坏的车更增加了回收、维修和重新投放的成本，直接导致收入的损失以及品牌声誉的下降。在共享单车的使用场景中，不能被及时满足的顾客骑行需求，会迅速被其他方式所替代，比如乘客可能选择步行或打车。为此，需要研究如何估计系统在不同运维安排下的表现以及如何进行最优的资源分配。坏车的回收、维修和重新投放对整个共享单车系统的高效运行有着决定性意义。

2 文献综述

现有与本文研究内容相关的工作主要可以分为四个主题，分别是考虑了坏车的共享单车研究、封闭排队网络在分析系统中的应用、基于系统仿真的共享单车研究以及仿真优化算法。以下对现有相关文章进行梳理。

考虑了坏车的共享单车研究 Reiss 和 Bogenberger[17] 建立了共享单车的需求模型, 使用了几个月的历史订单数据以预测特定时间和地点的需求。Pal 等 [16] 建立了一种新颖的混合整数线性规划方法来解决共享单车的静态重定位问题, 其算法可以解决静态重定位问题规模的增加。Pal 等 [15] 考虑了自变量之间的相互作用, 并表明通过考虑这种相互作用可以获得关于流动性模式和失衡的更多见解。Schuijbroek 等人 [20] 将每个站点的需求作为队列看待, 以得出每个站点的服务水平。Kapsi 等人 [8] 提出了一种贝叶斯模型, 以估算特定自行车无法使用的概率。Kaspi 等人 [9] 指出即使损坏自行车的比例很小, 但仍然会严重地影响用户对整个共享单车系统的满意度。王涵霄等研究了单车的使用寿命。徐国勋等人 [27] 在有桩共享单车场景中, 使用禁忌搜索算法, 求解损坏单车的回收规划问题。

封闭排队网络 Li 等 [11] 是最先使用封闭排队网络来描述和分析单车系统的。他们将有桩共享单车系统中的自行车视为“虚拟客户”; 停车区和道路被视为“虚拟服务台”。对于这种封闭排队网络, Li 等 [13] 人从三个方面进一步扩展和归纳了它: 道路结构是不可约图。真正的客户到达是马尔可夫到达过程, 公路上的骑行时间是独立同分布的。进一步, Li 等 [12] 通过封闭排队网络应用流体和扩散极限来分析共享单车系统。除此之外, 排队网络经常被用来研究其他服务系统经 Adelman 等人 [2] 使用封闭式排队网络来对不同地理位置之间运输集装箱的流程进行建模。George 等人 [6] 构建了租车系统的封闭排队网络模型, 然后确定汽车租赁公司的最佳车队规模, 并得出公司的每个租赁站处汽车的可用性。

基于系统仿真的共享单车研究 仿真方法在共享单车问题中主要被用来研究系统的状态和如何对不同区域间的单车进行调度。Neghaban[19] 使用仿真方法研究了系统的需求情况。比较了有桩共享单车中被满足了的需求和实际总需求之间的差异, 并提出一种综合性的方法对实际总需求进行估计。韩琦等使用仿真方法分析了共享单车系统中车的转移状态。Caggiani 和 Ottomanelli[4] 以最大程度地降低自行车共享运营商的车辆重新安置成本同时达到较高的用户满意度为目标函数, 通过仿真考虑路线选择来确定最佳调度流程。孙怡璇等 [23] 基于实际调研得到的数据, 结合仿真方法求解了共享单车的调度问题。

仿真优化 仿真优化方法是一类适用于目标函数的值通过仿真得到, 基于仿真结果求解最优解的算法。Jian 等 [7] 使用一种近似于梯度方法的启发式仿真优化算法优化纽约城市公共自行车的自行车和车桩的分布。排选方法 (Ranking and Selection Method) 是仿真优化中一类用来解决从数量相对而言较少个系统的仿真结果中选择出最优系统的方法。其中考虑无差别区域 (Indifference Zone, 设定的认为两个系统没有差别的阈值) 的典型的包括两阶段 [18]、若干阶段 [5]、两阶段带筛选 [14] 和完全序列化的方法 [1]。通过使用排选算法可以以较少的仿真投入, 在一定置信度下保证所选择出的系统是最优的。

在现有的工作中对系统的状态,包括需求预测和车辆运转,和车辆的调度有较多研究。而对坏车(不能服务顾客的共享单车,包括已维修但未投放运营的单车,后文同)的回收、维修和投放的研究工作还很少。运维环节会如何影响系统整体表现,特别是,在运维投入有限的情况下,如何进行资源在维修和运载之间的安排的问题,还没有得到解决。本文通过对共享单车运维系统建立封闭排队网络模型,探究了单车运营各个环节对系统整体服务性能的影响。进一步,结合排选算法,在有资源约束的条件下,求解系统最佳的运维安排。

后文的内容为:(一)构建系统的运行模型,在运行模型的基础上,给出本文要求解的优化问题;(二)介绍基于系统状态转移方程和仿真的求解系统性能指标的方法,给出求解优化问题的算法;(三)进行数值实验,验证前述求解方法的正确性,在设定的算例上进行系统性能指标求解和优化问题求解,并分析实验结果;(四)结论。

3 模型构建

3.1 模型描述

在共享单车的运作可以分解为两大部分:状态正常并可供用户取用的服务部分和不能够供用户骑行的正在被回收、维修和再投放部分。我们在本文中将损坏单车的回收、维修和投放统称为共享单车的运维。共享单车的无桩模式相较有桩模式而言,单车的分布情况是比较散乱的。而在实际中,单车的运维都是基于一定区域进行的。因此共享单车的运行区域可以抽象成一个个相邻的区域。加上单车的运维部分,整体构成共享单车的运行系统。通常情况下,共享单车采用集中式维修的模式。在该模式下,操作员使用运载工具,例如电动三轮车或厢式货车,将自己负责区域内的自行车收集起来批量运送至维修中心。维修好的自行车将被批量集中重新分配到各个区域。其中一些无法维修的将被替换成新车,因此可以认为一定时期内系统中总的单车数量是固定的。这样的过程持续进行。在本文中,投放策略不是重点讨论对象。统一为根据各个区域的顾客到达速率进行按比例分配,具体见后文。基于对实际情况的抽象和一些基本假设,构建了封闭排队网络模型。以两个区域的单车系统为例,如图 1所示。

具体有如下假设:(1)共享单车的运行可以抽象成按区域进行,一段时期内固定区域内的总单车数量固定不变;

(2)顾客到达某区域后,如果有好车,则任选一辆单车,以一定转移概率骑往其他区域;

(3)一辆单车的骑行过程完毕后,以一定的概率进入骑行开始时就已经确定的目标区域,另有可能进入损坏

状态；

(4) 进入损坏状态的单车需要通过回收、维修和再投放的过程，才能再度投入使用；

(5) 运载车每隔指数时间将不多于自身容量的尽可能多的坏车回收至维修中心或将维修完毕的好车投放至各个区域；

(6) 同一辆运载车的回收和投放作业交替进行；

(7) 维修中心有若干服务台

(8) 每个区域的顾客到达、顾客骑行、运载车的回收和投放、维修服务台的维修过程的时间间隔服从一定的指数分布；

(9) 系统参数可以通过系统运行历史数据估计得到，认为已知。

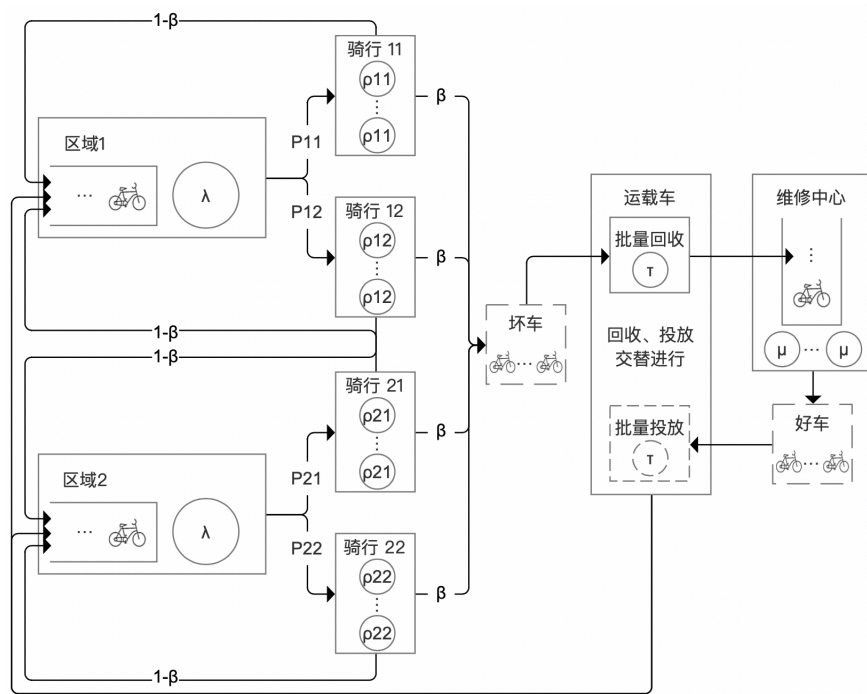


图 1: 共享单车运维排队网络建模示意图

3.2 符号标记

表 1和表 2分别给出系统状态变量的各分量描述和系统的各项参数。

表 1: 状态随机变量分量表

符号	含义
i, j	队列的脚标, $i, j = 1, \dots, A$
t	系统时间变量
N_i	在队列 i 处的好车数
R_{ij}	正在被从 i 骑到 j 的车数
BP	当前等待被运送至维修中心的坏车数
RC	当前维修队列处的坏车数
DP	当前等待被重新投放的坏车数
GD	标记当前正在进行的过程是回收或是投放

3.2.1 系统参数

表 2: 参数表

参数	描述	默认值
A	区域数	2
M	总车数	6
β	损坏概率	0.3
P_{ij}	从 i 到 j 的骑行概率	随机数
λ_i	区域 i 顾客到达速率	随机数
ρ_{ij}	从 i 骑行到 j 的速率	i, j 的曼哈顿距离加一的倒数
τ	运维速率	1.0
C	运载车容量	3
μ	单服务台维修速率	1.0
N	服务台数量	1.0

3.3 运维模型

将在各队列中的自行车数作为状态向量的元素，我们使用

$$\mathbf{X}_t = (N_1, \dots, N_i, \dots, N_A, R_{11}, \dots, R_{ij}, \dots, R_{AA}, BP, RC, DP)_t$$

来表示系统在任意时间 t 的状态。

共享单车可以在各个区域中被骑行，从一个区域到达另一个区域或到达自身。骑行的时间根据区域间的距离不同，服从一定的指数分布。因而任意两个区域间相当于存在一个 $M/M/\infty$ 队列。一次骑行完毕后，单车到达某个区域，进入这个区域的等待队列。每个区域的顾客到达服从一定参数的泊松分布。于是相当于可以服务的单车到达一个区域时进入一个 $M/M/1$ 队列进行等待。当这个等待队列中没有单车时，新到达的顾客马上流失。当单车骑行完毕时也有可能进入损坏状态，此时其进入一个回收池 *Broken Pool*（简记为 BP ）。运载车负责将系统中损坏的单车回收运送至维修中心，和将维修中心处维修完毕的好车重新投放到运

营之中。这里以 *Distribute Pool* (简记为 *DP*), 表示待投放的单车数量。运维车的操作时间服从参数为 τ 的指数分布。也即, 每隔一个参数为 τ 的指数分布时间, 运维车会搬运运载能力以内的尽可能多的坏车转移至维修中心, 之后再经过参数为 τ 的指数分布时间, 维修后的好车被重新通入运营, 这两个过程交替反复进行。通常在日常运行中还有一项工作是, 搬运各个区域中分布的好车, 以使各个区域中的可使用的单车数量尽可能满足该区域的骑行需求。因为通常现实中单车的调度也不是持续不断的进行的, 而是隔一段时间进行, 或者夜间进行, 在调度过程中可以看做是不受控制的运行。或者根据实际运行情况, 某个区域当前或者预期需求持续得不到满足, 而需要往这个区域调配车辆。投放策略本身是一个重要的、值得研究, 并且已经有很多研究的工作 [3] [26]。在本文中不作为重点讨论对象。为简化问题, 转而采用一种较固定的可行策略: 根据各个区域的顾客到达率和单车总数设置各个区域的目标数量, 之后的投放以此为目标数量。需要注意的是, 为了模型的精简, 这里的回收和重新投放过程, 对现实中的操作进行了简化和抽象。只为了抓住批量化回收的特征和用参数去刻画回收和投放的能力强弱。由以上我们可以描述封闭排队网络模型所对应的连续时间马尔可夫过程。由于每个队列处的服务时间的马尔可夫性, 系统状态整体是一个连续时间马尔可夫链 (Continuous-Time Markov Chain, CTMC)。因为好车可以以一定概率在任意区域之间被骑行, 损坏了的, 将在维修后重新投放至各区域。

由于时间发生时间的随机性, 并且单车可以在好坏状态之间进行转换, 显然系统中任意一个状态可以以一定概率经过一定时间后转移到任意另一个状态。因此, 这是一个遍历 (Ergodic) 的马尔可夫链。由马尔可夫链的性质, 系统存在长程稳定状态。由此, 我们在给定系统参数设置下, 可以通过系统状态概率转移方程, 求解系统处于各个状态概率, 从而得到系统性能指标。

3.4 决策模型

在单车的日常运营中需要确定采用多少运载能力和维修能力。在本模型中主要包括运载车的数量和运维中心需要多少维修工人。基于前述建模的系统性能参数仍难以进行显式的表达, 也因而难以直接作为目标函数进行优化。但是通过仿真的方法, 可以较方便地获得系统性能参数。通过对前述仿真模型的扩展, 可以轻易仿真系统中有多辆运载车同时运行的情况。系统中可分配到运载车和维修人员的资源预算为给定的有限值。不同运载量运载工具的单位平均成本, 单位维修人员的成本也作为默认值给定。在本文中我们主要关注最小化系统中顾客损失。对应的变量如表所示。

表 3: 决策问题相关变量表

符号	含义
n_R	决策变量, 维修中心服务台的数量, 正整数
n_C	决策变量, 运载车的数量, 正整数
$Cost_R$	单位维修中心服务台成本
$Cost_C$	单位运载车成本
T	预算总数

需要求解的问题如下:

$$\begin{aligned}
 & \arg \min_{n_R, n_C} \mathbb{E}[\text{顾客损失比例}] \\
 & s.t. \quad n_R Cost_R + n_C Cost_C \leq T \\
 & \quad \quad n_R, n_C \in \mathbb{N}^+
 \end{aligned}$$

4 模型求解

在本部分, 首先给出一个基于马尔可夫链长程稳态概率的系统性能求解方法。对于一个遍历的连续时间马尔可夫链, 当时间趋向于无穷大时, 系统处于各个状态的时间比例收敛于其极限概率。我们通过构建系统的状态转移概率方程, 求解得到系统处于各状态的长程比例, 并由此给出性能指标计算公式 [21]。

上述马尔可夫链的状态数量可通过系统中的区域数量、车的总数和运载车的数量计算得到, 为 $2^C \times \binom{A+A^2+3+M}{M}$ 。这意味着状态数量随区域数量、车的总数和运载车的数量的增长呈指数增长。于是, 该系统对应的多元线性方程组将变得非常庞大, 而难以求得精确解。而仿真的方法计算系统的性能参数, 可以无需知晓所有状态, 从而较快地收敛。因此, 我们提出离散事件仿真的方法, 计算得到系统的性能参数。

本文所要求解的决策问题的解空间为有限、离散的情况。对每一组解, 由于随机性, 仿真的结果会存在波动。每一组参数设置下的期望系统性能参数难以通过比较仿真实验的均值直接得到。我们使一种排选算法 (Ranking and Selection Algorithm), Kim 和 Nelson 在 2001 年提出的 Fully Sequential, Indifference-Zone Method, 求解本文的决策问题。

4.1 CTMC 状态方程求解方法

记 S 为系统所有可能的状态的集合, s 为集合中元素。记

$$s^T = (N_1, \dots, N_A, R_{11}, \dots, R_{AA}, BP, RC, DP, GD)^T$$

为系统状态向量。对于一个排队过程, 由系统状态转移的偏微分方程可以构建任意系统状态其转出率与转入率相等的方程。因为系统中的总的车数固定, 所以其符合下式:

$$\begin{cases} \sum_{i \in [1, A]} (N_i + \sum_{j \in [1, A]} R_{ij}) + BP + RC + DP = M; \\ N_i, R_{ij}, BP, RC, DP \text{ 为 } [0, M] \text{ 间的正整数.} \end{cases} \quad (1)$$

$$GD = \begin{cases} 0, & \text{坏车搬运} \\ 1, & \text{好车投放.} \end{cases} \quad (2)$$

记 π_s 为状态 s 的极限稳态概率。我们记 I_{N_i} , I_{BP} 和 I_{DP} 如下:

$$I_{N_i} = \begin{cases} 1, & N_i > 0; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (3)$$

由马尔可夫链的性质, 系统稳态下任意状态的转出速率为该状态可以到达的任意下一状态的长程比例乘以相应转移速率之和。即:

$$Rate - out_s = \left(\sum_{i \in [1, A]} \lambda_i I_{N_i} + \sum_{i \in [1, A]} \sum_{j \in [1, A]} \rho_{ij} R_{ij} + \lambda + \mu \min\{RC, N\} + \tau \right) \pi_s. \quad (4)$$

我们记示性函数 $F_{s'}$ 如下, 其表示一个状态是否是可能存在的, 存在为 1, 不存在为 0.

$$F_{s'} = \begin{cases} 1, & \sum_{i \in [1, A]} (N_i + \sum_{j \in [1, A]} R_{ij}) + BP + RC + DP = M; \\ & N_i, R_{ij}, BP, RC, DP \text{ 为 } [0, M] \text{ 间的正整数;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (5)$$

同样由马尔可夫链的性质，系统稳态下任意状态的转入速率为任意可以到达该状态的上一状态的长程比例乘以相应转移速率之和。而投放前各区域的好车数需要由投放策略倒推得到。本文中采取根据各区域顾客到达率按比例分配的策略。初始目标投放量根据每个区域的到达速率按比例进行设置。在每次投放时，按照每个区域的到达率从高到低排序，依次检查区域中当前的好车数是否达到原始设定的目标值，如果没有达到则尽可能补充到目标值。再投放下个区域。直到待投放的好车数为 0 或所有区域已检查过。根据这个策略可以得到所有可能的投放前系统状态集合 Q 。

则马尔可夫过程稳态情况下任意系统状态，可能由另一个状态经由（1）顾客骑走一辆好车；（2）骑行到达；（3）骑行损坏；（4）坏车运送至维修中心；（5）维修完毕进入投放队列；（6）投放至各区域，这六种过程的某一种而进入。从而确定系统某状态的转入速率为：

$$\begin{aligned}
Rate - in_s = & \sum_{i \in [1, A]} \sum_{j \in [1, A]} \lambda_i P_{ij} \pi(\dots, N_i + 1, \dots, R_{ij} - 1, \dots) F(\dots, N_i + 1, \dots, R_{ij} - 1, \dots) \\
& + \sum_{i \in [1, A]} \sum_{j \in [1, A]} \rho_{ji} R_{ji} (1 - \beta) \pi(\dots, N_i - 1, \dots, R_{ij} + 1, \dots) F(\dots, N_i - 1, \dots, R_{ij} + 1, \dots) \\
& + \sum_{i \in [1, A]} \sum_{j \in [1, A]} \rho_{ij} R_{ij} \beta \pi(\dots, R_{ij} + 1, \dots, BP - 1, \dots) F(\dots, R_{ij} + 1, \dots, BP - 1, \dots) \\
& + \tau \sum_{B \in [1, \min\{C, RC\}]} \pi(\dots, BP + B, RC - B, \dots, GD = 1) \\
& + \mu \min\{RC, N\} \pi(\dots, RC + 1, DP - 1) F(\dots, RC + 1, DP - 1) \\
& + \tau \sum_{q \in Q} \pi_q F_q
\end{aligned} \tag{6}$$

又有：

$$\sum_{s \in S} \pi_s = 1 \tag{7}$$

通过联立前述 (1)-(7) 式可以求解以上系统状态转移概率方程组，得到系统处于每个状态的长程比例。

4.1.1 系统运行指标计算

根据系统的每个状态的长程稳态概率，可以计算得到如下系统性能指标。

1、期望顾客损失率当系统中某个区域处没有好车时，新到达的顾客将会损失掉。因此通过没有好车的区域的顾客到达速率除以总的顾客到达速率可以得到期望任意状态的顾客损失比率例。再通过对所有状态加权

平均即可得到期望顾客损失率。

$$E[\text{顾客损失率}] = \frac{1}{M} \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{N_i \in s} I(N_i) \lambda_i / \sum_{i \in [1, A]} \lambda_i \quad (8)$$

2、期望好车比例系统中好车和坏车的比例可以由任意状态中的好车数量占车总数的比例求期望平均得到。

$$E[\text{好车比例}] = \frac{1}{M} \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{N_i \in s} N_i \quad (9)$$

3、期望维修服务台闲置率维修中心处可能会有多台服务台。当维修中心处待维修的单车数少于维修台数量时，即出现了服务台的闲置。因此通过维修中心处的车数除以服务台数得到某一状态的限制比例，再通过对所有状态平均，即可得到期望维修服务台闲置率。

$$E[\text{维修服务台空置率}] = \sum_{s \in S} \pi_s (1 - RC^s / N) \quad (10)$$

4.2 仿真方法

通过设置系统的状态转移规则，我们可以模拟前述提出的单车系统模型。通过向模型输入符合分布假设的随机数，可以模拟所建立的模型对应的系统的运行。当系统存在大量状态时，无论是方程求解还是在仿真中确保所有状态都被访问到，都需要大量时间。而实际系统无需访问大量状态，系统的性能指标也已进入稳定状态。基于仿真的方法可以较快地得到我们关心的系统性能指标。后文数值计算部分通过设置同样的参数，对比方程求解结果和仿真结果，验证了 CTMC 模型 ODE 方程求解方法与仿真方法的一致性。

在仿真中，通过记录系统状态的变化和状态持续时间，可以计算得到仿真进行到某一时刻为止，系统中好车比例的均值和维修中心闲置比例的均值；通过记录的到达顾客总数和未被服务而丢失的顾客总数相除，可以计算得到顾客损失比例。从而观察系统性能指标均值随时间的变化。观察这些指标随仿真运行时间的变化，可以判断系统是否进入稳态。取系统进入稳态后的一段时间，计算这段时间某性能指标的平均作为该指标的期望值 [22]。

4.3 排选算法

Kim 与 Nelson 在他们的工作中提出了 Fully Sequential, Indifference Zone Method[10], 该算法可以以设定的置信度 $1 - \alpha$ 从候选系统中挑选出均值最优的系统。参数 δ 表示无差别区间长度, 当两个待选系统在性能表现差距在 δ 以内时, 认为两个系统的性能表现相同。表现在结果上是当某些系统的均值与最优系统对应的均值之间的距离小于该值时, 多次执行算法, 这些系统也将被当做最优系统而以一定频率被选出。该方法的优点在于, 首先, 可以设置无差别区间, 从而可以认为决定什么样程度的性能差别是没有影响的; 其次, 其筛选过程中, 可以逐步剔除明显差的方案, 从而节省比较所需要的总样本数; 而且, 该方法虽然基于样本分布为正态的假设, 但是对样本分布非正态有着较好的抵抗力。可以应对在实际使用过程中, 样本分布的未知性。算法的参数输入如下表。

表 4: 算法输入参数表

符号	含义	默认值
k	待比较系统数量	随问题变化
$1 - \alpha$	置信度	0.05
δ	无差别区域宽度	0.01
n_0	初始样本量大小, $n_0 \geq 2$	20
c	算法参数	$c = 1$
i	第 i 个系统	$i = 1, 2, \dots, k.$
j	第 j 次观测	$j = 1, 2, \dots, n_0.$

记 X_{ij} 为系统 i 的第 j 个观测值。算法流程如算法 1 所示。

5 数值计算

5.1 运维模型求解

首先通过离散系统仿真的方法, 给系统设置如表 1 和 2 所示的默认系统参数。初始系统中所有车均为可骑状态, 并且平均分布于各个区域中。

算法 1 Fully Sequential, Indifference-Zone Procedure

输入: $k, \alpha, \delta, n_0, c, X$

输出: 最优系统编号

```

1: 初始化:
2:  $I = \{1, 2, \dots, k\}$ 
3:  $\eta = \frac{1}{2}[(\frac{2\alpha}{k-1})^{-2/(n_0-1)} - 1]$ 
4:  $h^2 = 2(n_0 - 1)c\eta$ 
5:  $S_{il}^2 = \frac{1}{n_0-1} \sum_{j=1}^{n_0} (X_{ij} - X_{lj} - [\bar{X}_i(n_0) - \bar{X}_l(n_0)])^2, \forall i \in I \text{ and } i \neq l$ 
6:  $N_{il} = \lfloor \frac{h^2 S_{il}^2}{\delta^2} \rfloor, \forall i \in I \text{ and } i \neq l$ 
7:  $N_i = \max_{l \neq i} N_{il}, \forall i \in I$ 
8:  $\bar{X}_i(r) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r X_{ij}$ 
9:
10: 初始判断:
11: if  $n_0 > \max_i N_i$  then
12:   return  $\arg \max_i \bar{X}_i(n_0)$ 
13: else
14:    $r = n_0$ 
15:   进入筛选过程
16: end if
17:
18: 筛选过程:
19: while  $|I| > 1$  do
20:    $\forall$  系统  $i \in I$  中添加一个观测值  $X_{i,r+1}$ 
21:    $r = r + 1$ 
22:   if  $r == \max_i N_i + 1$  then
23:     return  $\arg \max_i \bar{X}_i(r)$ 
24:   else
25:      $I^{old} = I$ 
26:     Update  $\bar{X}_i(r), \forall i \in I$ 
27:      $W_{il}(r) = \max\{0, \frac{\delta}{2cr}(\frac{h^2 S_{il}^2}{\delta^2} - r)\}, \forall i \in I \text{ and } i \neq l$ 
28:      $I = \{i : i \in I^{old} \text{ and } \bar{X}_i(r) \geq \bar{X}_l(r) - W_{il}(r), \forall l \in I^{old}, l \neq i\}$ 
29:   end if
30: end while
31: return  $I$ 

```

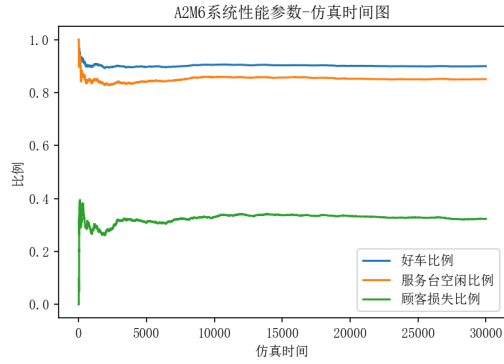


图 2: A2M6 系统性能参数-时间 30000 图

通过设置相同的参数比较，方程求解结果与仿真结果。如下图所示：

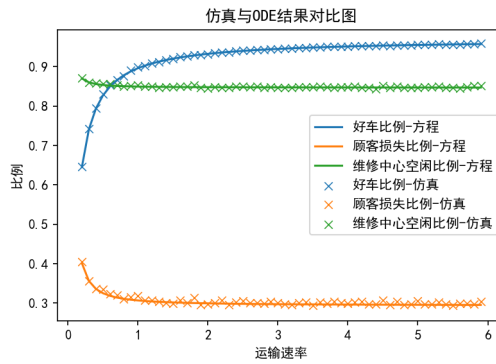


图 3: A2M6 方程与仿真结果对比图-变动运载服务台速率

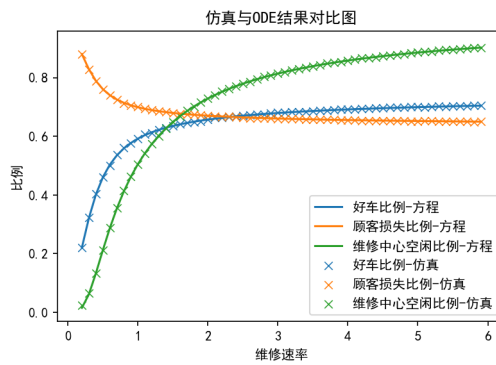


图 4: A2M6 方程与仿真结果对比图-变动维修服务台速率

由上两幅系统性能参数随系统单服务台运维能力变化图可知，单独提升运维系统中的某个运维服务台的性能，可以提升系统的表现，但提升效果存在边际递减现象。

通过比较方程求解和仿真的结果可以看到，仿真的方法可以良好地逼近系统性能参数的理论值。而系统

的状态数随着运载车数量每增加一辆就会翻倍，求解的时间也会大大增加。便利起见，以仿真的结果，研究系统中维修和运载服务台数量变化，引起的系统状态变化。

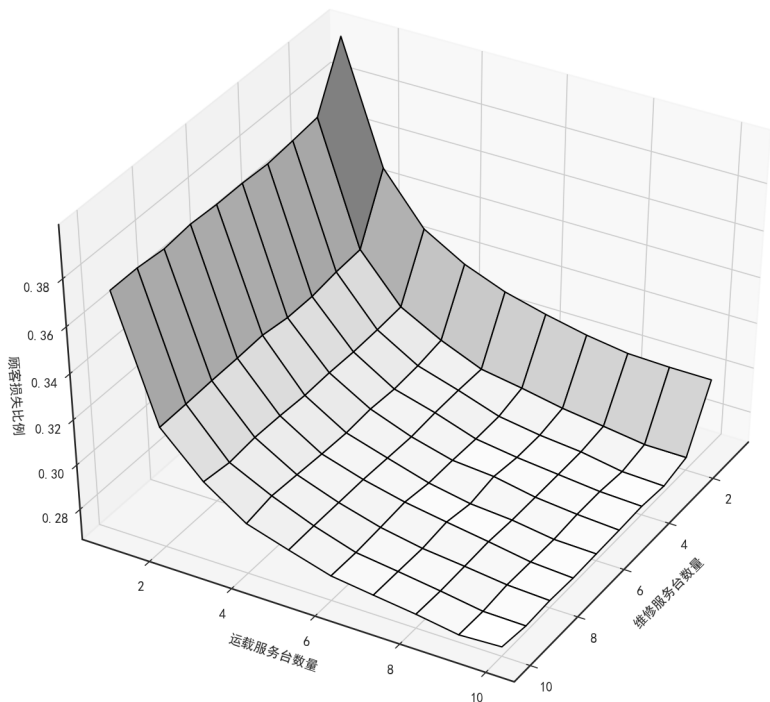


图 5: A2M6 运载服务台与维修服务台数量对系统顾客损失比例影响

从图中可以看到，单独增加维修或运载服务台的数量都可以使系统性能表现改善，但改善的效果逐渐减弱。当二者大到一定程度之后系统的性能表现几乎不再改善。由此可知，对一个共享单车运营系统而言，单纯通过增加维修或投放的能力对改善系统的性能表现是存在上限的。并且，过多的投入边际收益很低。

5.2 决策模型数值结果

本文所提出的两阶段算法，在第一阶段可以以一定概率保证选出最优方案，同时输出样本均值与最优方案相差在设定范围的方案集合。第二阶段通过计算方案集合中所有方案的成本，选择出成本最小的方案。

5.2.1 排选算法验证

我们首先在 $A=2$ ， $M=6$ 的条件下，求解只有一辆运载车时的退化决策问题以比较理论计算与排选算法的结果。

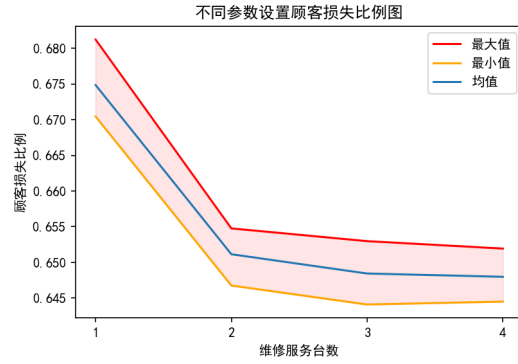


图 6: A2M6 方程与仿真结果对比图-变动维修服务台数量

如图中所示，当系统中维修服务台数量为 3 和 4 时，系统的性能指标非常接近。方程理论计算结果显示服务台数量为 4 时，系统性能表现最好，但二者之间的差距非常小。

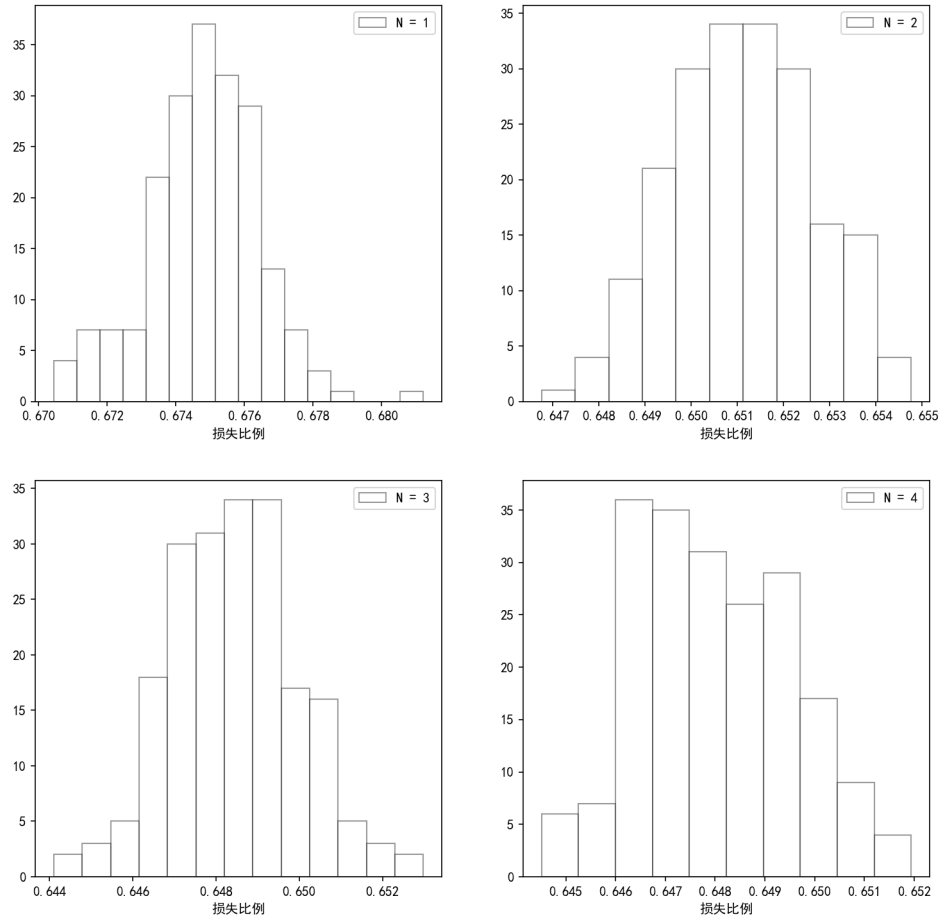


图 7: A2M6 仿真结果频数统计图

图 7 为不同服务台数量情况下仿真结果的分布。结果均能通过正态性的 KS 检验。可以认为排选算法适用于该问题。为了使正态性得到更好地保证，所有排选算法均以 3 次试验观测值的样本均值作为一个数据点。按照前述参数表中的算法参数设置，运行 1000 次排选算法，结果 N=4 被选中 974 次，N=3 选中 26 次。验证了算法的正确性。

5.2.2 数值算例

分别在 $A=2$, $M=6$ 和 $A=10$, $M=100$ 的情况下, 设置不同的随机种子, 初始化不同转移概率和到达率, 作为待比较方案。在如表 4 所给出的参数设置下, 运行 500 次排选算法, 以出现次数最多的方案为最佳结果。与此同时, 我们计算每个方案 100 次试验的均值, 记为简单均值, 以此为排名参照标准, 与排选结果进行比较。结果如表 5 所示。

表 5: $A=2$, $M=6$ 时排选算法与样本平均结果表

随机种子	排选最优结果 (n_R, n_c)	被选次数	平均使用样本数	样本均值最优方案 (n_R, n_c)	最优方案 样本均值	简单均值 样本数
1	(2,8)	148	904	(2,8)	0.254980	4500
2	(2,8)	343	900	(2,8)	0.421530	4500
2	(4,6)	184	927	(4,6)	0.400928	4500

表 6: $A=10$, $M=100$ 时排选算法与样本平均结果表

随机种子	排选最优结果 (n_R, n_c)	被选次数	平均使用样本数	样本均值最优方案 (n_R, n_c)	最优方案 样本均值	简单均值 样本数
1	(7,3)	500	900	(7,3)	0.843801	4500
2	(7,3)	500	900	(7,3)	0.853247	4500
2	(7,3)	422	900	(7,3)	0.854234	4500

由数值实验结果可以看到, 排选算法可以以较少的样本观测量要求, 选出性能指标满足给定要求的方案。适用于实际中难以进行取样的复杂系统, 进行若干方案中的可行方案的挑选。

6 结论

本文通过将共享单车的服务过程和坏车运维过程建模成封闭排队网络, 将共享单车的运维建模成封闭的排队网络, 构建了对应的连续时间马尔可夫过程。通过状态转移方程求得系统稳态概率和系统性能指标。并通过仿真方法模拟得到系统的性能指标。观察到共享单车运维系统中, 单独提高系统的运载速率或增加数量, 亦或是提升维修环节的速度或维修人员的数量, 对系统的改善作用都存在边际递减现象。因此, 在可分配资源总数有限的条件下, 需要在维修和运载环节之间进行合理分配。由于系统的复杂性, 理论求解难以进行, 通过仿真的方法可以较好地获得系统性能指标。进一步结合排选算法, 可以在给定置信度下, 以较小的运算成本, 确定可接受的最优方案。

参考文献

- [1] A fully sequential procedure for indifference-zone selection in simulation. *Acm Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2002.
- [2] Daniel Adelman. Price-directed control of a closed logistics queueing network. *Operations Research*, 55(6):1022–1038, 2007.
- [3] Caggiani, Leonardo, Camporeale, Rosalia, Ottomanelli, Michele, Szeto, Wai, and Yuen. A modeling framework for the dynamic management of free-floating bike-sharing systems. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2018.
- [4] Leonardo Caggiani, Rosalia Camporeale, Michele Ottomanelli, and Wai Yuen Szeto. A modeling framework for the dynamic management of free-floating bike-sharing systems. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 87(FEB.):159–182, 2018.
- [5] Dudewicz Siddhartha R. Dalal. Allocation of observations in ranking and selection with unequal variances. *Sankhya Ser A*, B:37(1):28–78, 1975.
- [6] David K George and Cathy H Xia. Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks. *European journal of operational research*, 211(1):198–207, 2011.
- [7] Nanjing Jian, Daniel Freund, Holly M. Wiberg, and Shane G. Henderson. Simulation optimization for a large-scale bike-sharing system. In *Winter Simulation Conference*, 2017.
- [8] Mor Kaspi, Tal Raviv, and Michal Tzur. Detection of unusable bicycles in bike-sharing systems. *Omega*.
- [9] Mor Kaspi, Tal Raviv, and Michal Tzur. Bike sharing systems: User dissatisfaction in the presence of unusable bicycles. *A I I E Transactions*, 49(2):144–158, 2017.
- [10] Seong Hee Kim and Barry L. Nelson. A fully sequential procedure for indifference-zone selection in simulation. *Acm Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 11(3):251–273, 2001.

- [11] Quan Lin Li, Rui Na Fan, and Jing Yu Ma. A unified framework for analyzing closed queueing networks in bike sharing systems. In *International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling*, 2016.
- [12] Quan-Lin Li, Rui-Na Fan, and Zhi-Yong Qian. A nonlinear solution to closed queueing networks for bike sharing systems with markovian arrival processes and under an irreducible path graph. In Wuyi Yue, Quan-Lin Li, Shunfu Jin, and Zhanyou Ma, editors, *Queueing Theory and Network Applications*, pages 118–140, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [13] Quan Lin Li, Zhi Yong Qian, and Rui Na Fan. Fluid and diffusion limits for bike sharing systems. In *International Conference on Queueing Theory and Network Applications*, 2017.
- [14] Barry L Nelson, Julie Swann, David Goldsman, and Wheyming Song. Simple procedures for selecting the best simulated system when the number of alternatives is large. *Operations Research*, 49(6):950–963, 2001.
- [15] Aritra Pal and Yu Zhang. Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 80(jul.):92–116, 2017.
- [16] Aritra Pal, Yu Zhang, and Changhyun Kwon. Analyzing mobility patterns and imbalance of free floating bike sharing systems. 2017.
- [17] Svenja Reiss and Klaus Bogenberger. Validation of a relocation strategy for munich’s bike sharing system. *Transportation Research Procedia*, 19:341–349, 2016.
- [18] Rinott and Yosef. On two-stage selection procedures and related probability-inequalities. *Communications in Statistics Theory and Methods*, 7(8):799–811, 1978.
- [19] Juan P. Romero, Angel Ibeas, Jose L. Moura, Juan Benavente, and Borja Alonso. A simulation-optimization approach to design efficient systems of bike-sharing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54(Complete):646–655, 2012.
- [20] J. Schuijbroek, R.C. Hampshire, and W.-J. van Hoeve. Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems. *European Journal of Operational Research*, 257, 2017.

- [21] Sheldon M. Ross. 应用随机过程: 概率模型导论. 人民邮电出版社, 2011.
- [22] Peter D Welch. The statistical analysis of simulation results. *The computer performance modeling handbook*, 22:268–328, 1983.
- [23] 孙怡璇; 周雨珊; 丛羽茜; 刘明. 基于仿真的共享单车调度优化研究. 物流科技, 041(010):56–61, 2018.
- [24] 国家信息中心分享经济研究中心. 中国共享出行发展报告. 2019.
- [25] 王慧君; 朱建明. 共享单车盈利模式分析. 企业经济, v.37; No.453(05):137–146, 2018.
- [26] 温惠英; 杨墨照. 基于迭代回归法的公共自行车投放量预测研究. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 000(002):245–248, 2014.
- [27] 徐国勋; 李妍峰; 向婷; 赵达. 考虑损坏自行车回收的共享单车调度问题. 系统工程, 2019.