【交通物流 / Transportation Logistics】

立体车库顾客到达的非齐次泊松过程模拟仿真

杨 波, 李建国, 康耀军

兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃兰州 730070

摘 要: 研究立体车库顾客的到达过程, 考虑顾客到达的泊松过程与非齐次泊松过程. 采用回归分析法获得顾客平均到达率与到达时间的关系, 通过模拟不同到达过程, 以 K-S 检验结果判定是否与实际到达属同一分布. 根据实际立体车库运行过程编写两种到达过程下的仿真程序. 仿真结果表明, 立体车库顾客实际到达过程为非齐次泊松过程; 对顾客源具有非齐次性特征的车库系统, 非齐次性是影响其运行效率的原因之一. 研究结果为模拟此类车库运行中的顾客到达过程提供参考, 为提高车库运行效率提供新思路.

关键词: 交通运输工程; 立体车库; K-S 检验; 非齐次泊松过程; 回归分析; 仿真

中图分类号: U491.7; O221.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.02121

Simulation of non-homogeneous Poisson process of customer arrival in stereo garage

YANG Bo, LI Jianguo, and KANG Yaojun

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: This paper studies the customer arrival process of stereo garage, considering both the Poisson process and non-homogeneous Poisson process for customer arrival. The relationship between average arrival rate and arrival time is obtained by regression analysis. By simulating different arrival processes, K-S test results are used to determine whether they belong to the same distribution as that of the actual arrival process. According to the actual operation process of stereo garage, two kinds of simulation programs under the arrival process are compiled. The simulation results show that the actual arrival process of customers in the garage is a non-homogeneous Poisson process. For the garage system with non-homogeneous customer source, non-homogeneous property is one of the reasons affecting its operation efficiency. This paper gives a reference for simulating the customer arrival process of such garage operation, and provides a new idea for improving the operation efficiency of the garage.

Key words: transport engineering; stereo garage; K-S test; non-homogeneous Poisson process; regression analysis; simulation

发展立体车库是解决城市停车难问题的有效途径之一, 中国立体车库的起步较晚, 其发展情况与国外相比存在一定差距^[1]. 立体车库相关研究主要包括车库的库位布局与搬运设备的配备、车位分配方式与搬运设备调度策略的系统控制研究. 顾客的

到达过程通过影响车库搬运设备的繁忙度与车库空闲车位数量, 进而影响车库的运行效率.

目前关于车库服务系统客流的研究中, 对客流状态的研究居多, 如文献[2-4]根据对不同到达率下的顾客流进行聚类、划分及识别, 选择不同调度

Received: 2020-07-02; Accepted: 2020-09-15

Foundation: Natural Science Foundation of Gansu Province (20JR5RA396)

Corresponding author: Associate professor LI Jianguo. E-mail: lijiaunguo@mail.lzjtu.cn

Citation: YANG Bo, LI Jianguo, KANG Yaojun. Simulation of non-homogeneous Poisson process of customer arrival in stereo garage [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 121-127. (in Chinese)

策略以达到提高车库运行效率的目的. 对具体顾客到达过程的研究则较少. 一般认为顾客的平均到达率恒定, 与到达时间无关, 如李建国等^[5]基于选取泊松到达, 对车库的库位布局 and 资源配置展开研究, 通过对比各配置下的车库运营效率指标, 得到最佳资源配置结果; 张芳芳等^[6-7]对车库存取车优化控制策略、车位分配进行以泊松到达为顾客源的仿真, 得到相关存取车优化策略, 并分析所提算法在车位分配中的有效性. 文献[5-7]均以泊松模拟顾客的实际到达, 但实际上并非所有的顾客到达都服从泊松分布, 如宋文波等^[8]通过复合非齐次泊松过程仿真, 得到满足预售期内旅客购票特点的票额分配方案; 董一凝等^[9]通过将非齐次泊松过程离散化为分段的齐次泊松过程, 解决了校园车辆的调度问题; 何恒等^[10]通过研究医院系统, 发现病患者到达过程服从非齐次泊松过程, 提出采用分段预约的策略, 缓解了排队问题.

本研究基于实际立体车库泊车数据, 通过 K-S 检验方法, 证明所研究车库的顾客到达属于非齐次泊松过程. 采用回归分析方法得到顾客平均到达率与到达时间的关系, 对车库运行过程进行仿真, 实现顾客到达的非齐次泊松过程模拟, 验证该模拟过程下的车库运行效率与实际更相符. 探究准确模拟车库服务系统顾客到达过程的必要性, 为具有此类顾客源车库的运行仿真过程提供借鉴.

1 顾客到达过程验证

非齐次泊松过程是泊松过程的一种推广形式, 是换了一个时钟来计时的泊松过程, 具有不平稳增量的特点, 与车库实际的顾客到达过程相似.

1.1 非齐次泊松过程

当泊松过程的强度 λ 与时间 t 相关时, 泊松过程被推广为非齐次泊松过程, 定义为

若计数过程 $\{N(t), t \geq 0\}$, $\lambda(t) > 0 (t \geq 0)$, 满足

- 1) $N(0) = 0$;
- 2) 过程有独立增量;
- 3) $P\{N(t+h) - N(t) = 1\} = \lambda(t)h + o(h)$;
- 4) $P\{N(t+h) - N(t) \geq 2\} = o(h)$;

则称 $N(t)$ 为具有强度函数 $\lambda(t)$ 的非齐次泊松过程. 其中, $\lambda(t)$ 为强度函数; $o(\cdot)$ 表示高阶无穷小.

1.2 顾客到达过程与到达时间数据分析

分析中国西安市某立体车库 2017 年 6 月至 2017 年 8 月的顾客泊车数据 (简称数据样本), 泊车时段基本为 07:00—23:00. 记顾客到达时间为 t , 相继到达的时间间隔为 d (单位: s) (当前顾客对应时间间隔为其后顾客到达时间减去当前顾客到达时间), 以 07:00 作为 0 时刻, 将数据样本中的顾客到达时间转换为以 s 为单位的数值, 任取数据样本中 20 个工作日与非工作日数据进行上述转换, 并将其按照到达时间转换后的数值大小依次排序, 结果如图 1.

图 1 到达时间与间隔时间的数据散点图

Fig. 1 Scatter plot of arrival time-interval time data

由图 1 可见, 到达间隔时间点均呈现上方稀疏、下方密集分布, 说明顾客到达时间间隔越小, 到达次数就越多, 某时间间隔内顾客到达次数的计数过程符合泊松分布特点; 在横向上可以观察顾客的到达率情况, 即不同到达间隔下的顾客到达量, 图 1 (a) 和 (b) 中均呈现先增后减再增的变化情形, 认为顾客到达率与到达时刻存在一定相关性. 因此, 推测该车库的顾客到达过程属于非齐次泊松过程. 对比图 1 (a) 和 (b) 数据散点的密集程

度可见,工作日数据散点较稀疏,工作日顾客到达数量少,对车库运行能力的要求相比非工作日低很多,因此,为提高立体车库运行效率的实际意义,本研究主要考虑非工作日的顾客到达过程。

1.3 顾客到达的非齐次泊松过程验证

非齐次泊松过程的验证常利用 $\lambda(t)$ 的连续性与缓慢变化性,将顾客到达过程转化为小区间上泊松性的分段常数,验证每个小区间上的泊松性是否成立^[11]。由于顾客到达的泊松过程与顾客相继到达时间间隔服从负指数分布等价^[12],因此,将顾客到达是否服从泊松分布转换为顾客相继到达间隔是否服从负指数分布问题。

K-S 检验是用于对比两类样本是否属于同一分

布的常用非参数统计方法^[13]。本研究尝试以 40 min 的时间间隔将图 1 (b) 非工作日中的到达时间划分为 24 个区间段,由于 800 ~ 960 min 的顾客到达数量较少,达不到检验要求条件,故舍去在此时段上的检验。因此,对图 1 (b) 中 07:00—20:20 划分为 20 个区间段,对各区间段进行显著性水平 $\alpha = 0.1$ 的单分布 K-S 检验,结果如表 1。其中, ω 为假设顾客到达间隔时间服从负指数分布的均值(单位: s); P 为显著性水平。由表 1 可见,按 40 min 划分,各区间段均保留到达间隔时间服从负指数分布的原假设,且各区间段内的间隔时间均值各不相同,由此证明该车库非工作日顾客到达过程属于非齐次泊松过程。

表 1 逐区间段 K-S 检验 ($\alpha = 0.1$)

Table 1 Interval-by-interval K-S tests ($\alpha = 0.1$)

到达时间/min	(0,40]	(40,80]	(80,120]	(120,160]	(160,200]	(200,240]	(240,280]	(280,320]	(320,360]	(360,400]
ω	343.67	625.00	686.67	591.50	1 362.00	287.25	322.57	354.30	422.67	629.50
P	0.906	0.922	0.765	0.973	0.482	0.138	0.282	0.130	0.694	0.949
决策	$P > 0.1$, 均保留各区间段到达时间间隔服从负指数分布的原假设									
到达时间/min	(400,440]	(440,480]	(480,520]	(520,560]	(560,600]	(600,640]	(640,680]	(680,720]	(720,760]	(760,800]
ω	504.20	264.00	475.33	506.60	513.00	1 974.50	360.00	810.80	856	799.25
P	0.636	0.122	0.628	0.346	0.569	0.110	0.170	0.998	0.823	0.271
决策	$P > 0.1$, 均保留各区间段到达时间间隔服从负指数分布的原假设									

2 顾客到达的非齐次泊松过程拟合

为更好模拟顾客到达的实际过程,采用回归分析方法得到顾客到达的非齐次泊松过程拟合模型。对其拟合优度进行检验,分别对比非齐次泊松过程模型、泊松过程模型与实际顾客到达过程,得出非齐次泊松过程更符合实际顾客到达过程的结论。

2.1 顾客平均到达率函数 $\lambda(t)$

由 1.3 节验证结果可知,该车库非工作日顾客到达过程符合非齐次泊松过程,仅在具体强度函数即 $\lambda(t)$ 上随到达时间有所不同,故可通过回归分析找到 d 与 t 的关系 $f(t)$ 。由回归分析基本定理,随机误差项均值 $E(\varepsilon_i) = 0$ ^[14],故用回归方程中的 $f(t)$ 代替平均间隔时间函数 $d(t)$ 。由图 1 (b) 可判断顾客到达间隔与到达时间关系为非线性关系,无法直接建立线性模型。根据广义线性回归法将非线性模型线性化后可直接进行线性回归分析^[15]。利用统计分析软件进行 $f(t)$ 对 t 的回归分析。其中,

顾客到达时间为自变量,顾客到达间隔时间为因变量,试选取二次、三次、线性及指数模型为拟合模型,以寻找适当的 $f(t)$,其拟合模型摘要与参数估计请扫描论文末页右下角二维码见表 S1,各拟合曲线如图 2。其中, R^2 用来衡量估计模型对观测值的拟合程度, R^2 值越接近 1,说明模型越精确; F 是回归方程的显著性检验; b_1 、 b_2 及 b_3 分别为三次方程

图 2 车辆到达平均间隔时间拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of mean time between arrivals of vehicles

中一次项、二次项及三次项系数. 可见, 三次模型的拟合度最好, 其 $R^2 = 0.247$, 说明到达时间与间隔时间存在相关性; F 值及显著性水平分别为 216.881 及 $7.19 \times 10^{-121} < 0.01$, 说明拟合效果显著. 因此, 以三次方程作为其回归模型.

为判断三次模型估计的有效性, 通过统计分析软件对已得估计模型随机误差项中同方差性进行检验, 运用加权最小二乘法对模型异方差进行修正, 得到最终回归模型的一般表达式为

$$f(t) = b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + c \quad (1)$$

其中, 常数 $c = 426.920$; $b_1 = 0.056$; $b_2 = -4.420 \times 10^{-6}$; $b_3 = 7.900 \times 10^{-11}$.

顾客平均到达间隔时间函数 $d(t) = f(t)$, 由此得 $\lambda(t)$ 为

$$\lambda(t) = 1/d(t) \quad (2)$$

因此, 该系统的顾客到达过程即可转化为在长度为 t 的时段内, 顾客到达量服从参数为 $\lambda(t)$ 的泊松分布, 或认为顾客相继到达的间隔时间服从参数为 $d(t)$ 的指数分布.

2.2 顾客到达分布拟合优度检验及对比

取图 1 (b) 数据为样本, 计算该样本顾客平均到达率 $\lambda = 5.6 \text{ veh/min}$, 再取该样本下拟合顾客平均到达率函数 $\lambda(t)$, 分别模拟 20 d 中 07:00—23:00 内的顾客到达过程, 按照 40 min 的时间间隔将以上时段划分为 24 个区间, 统计各区间顾客数量并计算 20 d 内各区间的平均到达顾客数量, 分别记为 HPP 样本和 NHPP 样本. 依照上述统计和计算方法对实际数据样本 20 d 中各区间平均顾客数量进行计算, 得到各样本顾客到达率分布, 如表 2.

表 2 各样本与实际到达率分布

Table 2 Customer arrival rate distributions for samples

单位: veh

区间序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
HPP 样本	6	5	6	6	5	4	5	5	4	6	4	5	4	6	6	5	5	5	4	5	6	4	5	4
实际样本	2	4	3	3	4	7	8	5	4	4	7	10	7	7	6	6	3	3	2	2	1	1	0	0
NHPP 样本	5	4	4	3	3	5	5	4	6	6	8	9	10	9	8	6	3	3	4	2	1	1	1	1

分别对 NHPP 样本、HPP 样本与实际样本进行两独立样本 K-S 检验^[13], 选取显著性水平 $\alpha = 0.1$. 检验结果中仅 NHPP 样本与实际样本的 K-S 检验渐近显著性 p 值为 $0.139 > \alpha$, 得到非齐次泊松到达与实际到达属于同一分布.

取表 2 中 HPP 样本、NHPP 样本与实际样本对应区间平均顾客量的差值(绝对值), 分别记为误差 1 和误差 2. 得到两样本与实际样本误差, 如表 3.

表 3 两样本与实际样本误差

Table 3 Errors between two samples and actual samples

区间序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
误差 1	4	1	3	3	1	3	3	0	0	2	3	5	3	1	0	1	2	2	2	3	4	3	5	4
误差 2	3	0	1	0	1	2	3	1	2	2	1	1	3	2	2	0	0	0	2	0	0	0	1	1

3 实例验证

3.1 车库运行过程建模及效率指标定义

为探究不同顾客到达过程对车库运行效率仿真结果的影响, 根据实际车库运行编写仿真程序. 以西安市某商业区附属车库为研究对象, 其结构为 2 层 12 列 2 排, 可用车位数 48 个, 所有车位均位于

地下, 1 个进出(I/O)口位于地面, 立体车库结构模型如图 3. 经现场调研得到该立体车库的设备特征参数值, 结合以下车库运行规则, 编写其运行仿真程序.

1) I/O 口坐标为 $(0, 0, 3)$, 升降机横坐标为 0, 其水平移动 1 个车位用时 5 s, 竖直移动 1 层需要 7 s. 顾客到达后车辆入库检查及进行存取操作的时间固定为 60 s.

图3 立体车库结构模型

Fig. 3 Stereo garage structure model

$$T = \frac{\sum_{j=1}^J \left(\sum_{j_1=j-A_j}^{j-1} T_{Cj_1} + \sum_{k_1=k'-B_j}^{k'} T_{Qk_1} \right) + \sum_{k=1}^K \left(\sum_{j_2=j'-A_k}^{j'} T_{Cj_2} + \sum_{k_2=k-B_k}^{k-1} T_{Qk_2} \right)}{J + K} \quad (3)$$

其中, J 为总存车顾客数; j 为存车用户 ($j = 1, 2, \dots, J$); K 为总取车顾客数; k 为取车用户 ($k = 1, 2, \dots, K$); 当等待队列中有 A_j 个待存车用户, B_j 个待取车用户, 且等待队列中最后一个取车用户编号为 k' 时, j_1 为当前存车用户, 对应接受服务时长为 T_{Cj_1} , k_1 为当前取车用户, 对应接收服务时长为 T_{Qk_1} ; 当等待队列中有 A_k 个待存车用户, B_k 个待取车用户, 等待队列中最后一个存车用户编号为 j' 时, j_2 为当前存车用户, 对应接受服务时长为 T_{Cj_2} , k_2 为当前取车用户, 对应接受服务时长为 T_{Qk_2} .

2) 顾客平均等待队长 Q 由服务顾客总数及每位顾客的等待队长决定, 表征每位顾客等待队长的平均值. Q 的表达式为

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^J (A_j + B_j) + \sum_{k=1}^K (A_k + B_k)}{J + K} \quad (4)$$

3) 结合实际调研, 取 15 min 为顾客可等待的最大时长, 顾客流失率 R 为

$$R = \frac{M}{J + M} \quad (5)$$

其中, M 为未接受服务离开的顾客数.

3.2 顾客到达过程实例仿真

任取数据样本非工作日中的某几天作为实际参照, 依顾客平均到达率函数 $\lambda(t)$ 与数据样本中顾客平均到达率 $\lambda = 5.6 \text{ veh/min}$, 分别模拟车库在 6 月 4 日、7 月 9 日、7 月 29 日及 8 月 19 日的顾客到

2) 服务规则服从先到先服务原则.

3) 顾客到达后遵循就近存车的调度策略, 当有车辆被取出时, 则根据出车优先原则接受服务.

4) 以顾客离开车库时间减去顾客到达时间近似为顾客库内停留时间样本, 拟合得到该车库顾客的库内停留时间 (单位: min) 服从正态分布, 其均值 $\mu = 208 \text{ min}$, 方差为 $\sigma^2 = 30$.

5) 假设车库初始状态为空库状态, 顾客到达时间段为 07:00—23:00.

依据实际调研分析车库的运行效率指标如下.

1) 顾客平均等待时间 T 由服务顾客总数与顾客等待总时间决定, T 越小说明车库的运行效率高. T 的表达式为

达非齐次泊松过程与齐次泊松过程, 结果如图 4. 可见, 不同时段顾客到达率的变化趋势反映了不同的顾客到达过程. 其中, 模拟泊松到达过程的顾客到达率基本保持恒定; 而非齐次泊松到达过程顾客到达率随顾客到达时间的不同而不同, 其变化趋势与实际吻合, 整体呈现顾客到达率先增后减的趋势. 整体拟合曲线进一步验证 2.2 节所得结论, 表明该车库系统非工作日顾客的到达过程为非齐次泊松过程.

3.3 车库运行效率指标仿真分析对比

编写车库运行仿真程序, 获得顾客到达为泊松过程与非齐次泊松过程的仿真结果, 并与车库实际运行效率指标对比分析, 以探究仿真与实际结果的相似度, 及顾客不同到达过程对仿真结果的影响.

3.3.1 泊松到达过程下的车库运行仿真

取 $\lambda = 5.6 \text{ veh/min}$ 模拟顾客到达为泊松过程的车库运行过程, 程序运行 30 次, 每次取参数为 λ 的泊松流, 将各仿真指标的平均值作为该车库非工作日顾客齐次泊松到达过程下的车库运行效率指标, 结果为顾客平均等待时间 $T = 0.581 \text{ min}$; 顾客平均等待队长 $Q = 0.170 \text{ veh}$; 平均顾客流失率 $R = 0$.

3.3.2 非齐次泊松到达过程下的车库运行仿真

重复上述仿真过程, 将 λ 变为 $\lambda(t)$, 得到非工作日顾客非齐次泊松到达过程下的车库运行效率指标, 其中, $T = 2.412 \text{ min}$, $Q = 1.105 \text{ veh}$, $R =$

图 4 不同到达过程顾客到达时间拟合

Fig. 4 Fitting curve of customer arrival time for different arrival processes

0.128%. 因此,在总体顾客平均到达率相同的情况下,不同顾客到达过程对应的车库运行仿真结果相差较大,表现在非齐次泊松到达过程下的车库运行效率指标较齐次泊松过程有大幅降低。

3.3.3 对比非工作日车库实际运行效率指标

经现场调研并分析顾客泊车记录,非工作日顾客集中到达时段为 13:00—17:00,故着重调研该时段实际顾客到达过程下的车库运行情况,得 $T = 4.032 \text{ min}$, $Q = 2.823 \text{ veh}$, $R = 0.161\%$ 。可见,非工作日顾客集中到达时段内的车库运行效率指标,与顾客到达为非齐次泊松过程的车库运行仿真结果更接近,表明此车库顾客到达过程模拟采用非齐次泊松过程时的结果更好。

结 语

本研究以西安市某商业区附属车库为研究对象,根据顾客泊车数据,仿真不同顾客到达的车库运行状况,对比仿真结果得到,顾客到达为非齐次泊松过程的仿真结果与车库实际运行效率指标更接近。当顾客到达过程不确定时,将非齐次到达过程视为齐次到达过程,可能会导致车库运营效率指标不准确,进而造成车库系统研究决策上的偏差。

在实际运营效率指标较低的情况下,以齐次泊松过程模拟的顾客到达下的车库运营效率指标更有利,而采用非齐次的顾客到达更契合实际。鉴于此,针对具有非齐次性顾客到达的立体车库,可以考虑采取分时段调整调度策略和配置搬运设备等措施减缓顾客到达非齐次性的影响,达到提高车库运行效率的目的。

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目 (20JR5RA396)

作者简介: 杨 波 (1989—), 兰州交通大学硕士研究生。研究方向: 交通运输工程。E-mail: 1039410856@qq.com

引 文: 杨 波, 李建国, 康耀军. 立体车库顾客到达的非齐次泊松过程模拟仿真[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(2): 121-127.

参考文献 / References:

- [1] 付立华, 白靖宇, 庞展翔. 一种智能立体车库的设计与实验室实现[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(4): 62-66.
FU Lihua, BAI Jingyu, PANG Zhanxiang. Design and laboratory realization of an intelligent stereo garage [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(4): 62-66. (in Chinese)
- [2] 华文瀚, 田怀文. 堆垛式立体车库存取车策略及路径

- 优化问题的分析研究[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 260-262.
- HUA Wenhan, TIAN Huaiwen. Research on storage-retrieval operation strategy and optimization of automatic stereoscopic garage [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(3): 260-262. (in Chinese)
- [3] 刘美菊, 彭堰艳, 龚志恒, 等. 基于随机森林的群控立体车库运行模式识别研究[J]. 电子器件, 2014, 37(3): 514-518.
- LIU Meiju, PENG Yanyan, GONG Zhiheng, et al. Stereoscopic garage group control traffic pattern recognition based on random forests [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(3): 514-518. (in Chinese)
- [4] 贺云鹏, 李建国. 平面移动式立体车库客流状态聚类研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(3): 314-322.
- HE Yunpeng, LI Jianguo. Passenger flow state clustering in flat mobile automated garage [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(3): 314-322. (in Chinese)
- [5] 李建国, 张海飞, 周璐婕, 等. 基于改进遗传算法的立体车库布局对比及服务资源优化[J]. 西南大学学报自然科学版, 2019, 41(4): 139-148.
- LI Jianguo, ZHANG Haifei, ZHOU Lujie, et al. Stereo garage layout and service resources optimization based on an improved genetic algorithm [J]. Journal of Southwest University Natural Science Edition, 2019, 41(4): 139-148. (in Chinese)
- [6] 张芳芳, 韩宝林, 梁飞. 升降横移式立体车库控制策略的研究[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(4): 90-91.
- ZHANG Fangfang, HAN Baolin, LIANG Fei. Research on control strategy of lift-sliding stereoscopic garage [J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(4): 90-91. (in Chinese)
- [7] 王小农, 李建国, 贺云鹏. 平面移动式立体车库车位分配的建模与仿真[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1): 54-62.
- WANG Xiaonong, LI Jianguo, HE Yunpeng. Modeling and simulation of parking space allocation in plane mobile stereo garage [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(1): 54-62. (in Chinese)
- [8] 宋文波, 赵鹏, 李博. 考虑动态购票需求的高速铁路票额分配[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 20-27.
- SONG Wenbo, ZHAO Peng, LI Bo. High-speed railway ticket allocation considering dynamic ticket booking demand [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(9): 20-27. (in Chinese)
- [9] 董一凝, 宴清照, 李志强, 等. 基于泊松过程的校园车辆调度模型研究[J]. 北京化工大学学报自然科学版, 2010, 37(6): 141-144.
- DONG Yining, YAN Qingzhao, LI Zhiqiang, et al. A model of campus vehicle scheduling based on Poisson process [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology Natural Science Edition, 2010, 37(6): 141-144. (in Chinese)
- [10] 何恒, 张顶立, 李惠平, 等. 服务系统顾客到达的非齐次泊松过程仿真研究[J]. 系统工程, 2019, 37(6): 148-154.
- HE Heng, ZHANG Dingli, LI Huiping, et al. Simulation study on non-homogeneous Poisson process of customer arrival in service system [J]. Systems Engineering, 2019, 37(6): 148-154. (in Chinese)
- [11] 宁如云. 非齐次泊松过程的仿真方法[J]. 高等数学研究, 2012, 15(1): 86-89.
- NING Ruyun. Simulation of nonhomogeneous Poisson processes [J]. Studies in College Mathematics, 2012, 15(1): 86-89. (in Chinese)
- [12] 张颖, 王建业, 王海龙, 等. 基于泊松分布的集成电路寿命计算[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(3): 71-74.
- ZHANG Ying, WANG Jianye, WANG Hailong, et al. Integrated circuit life calculation based on Poisson distribution [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(3): 71-74. (in Chinese)
- [13] 刘艳, 程璐, 孙林. 基于K-S检验和邻域粗糙集的特征选择方法[J]. 河南师范大学学报自然科版, 2019, 47(2): 21-28.
- LIU Yan, CHENG Lu, SUN Lin. Feature selection method based on K-S test and neighborhood rough sets [J]. Journal of Henan Normal University Natural Science Edition, 2019, 47(2): 21-28. (in Chinese)
- [14] 胡菊华. 基于残差分析的线性回归模型的诊断与修正[J]. 统计与决策, 2019, 35(24): 5-8.
- HU Juhua. Diagnosis and correction of linear regression model based on residual analysis [J]. Statistics & Decision, 2019, 35(24): 5-8. (in Chinese)
- [15] 许开成, 毕丽苹, 陈梦成. 基于SPSS回归分析的锂渣混凝土抗压强度预测模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 15-24.
- XU Kaicheng, BI Liping, CHEN Mengcheng. Prediction model of compressive strength of lithium slag concrete based on SPSS regression analysis [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1): 15-24. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】

补充材料

<http://journal.szu.edu.cn>