

融合空间热力图与ARIMA模型的校园共享电动车短时需求预测

吴妍洁 邓林*

武汉东湖学院 计算机科学学院, 中国·湖北 武汉 430212

摘要: 校园共享电动车的借还行为受课程作息与功能区布局双重驱动, 早晚高峰呈现显著的空间潮汐现象, 导致局部区域车辆短缺与运维成本攀升。研究基于模拟订单数据, 构建“空间可视化—时序建模—预测对比”分析框架: 空间维度采用网格化统计与核密度估计绘制借还热力图, 以归一化潮汐差异指标识别供需失衡区域; 时间维度针对宿舍、教学、食堂等功能区建立小时级需求序列, 对比移动平均与 ARIMA 模型的提前 1 小时预测精度。结果表明, 宿舍区与教学区潮汐差异最为突出, ARIMA 模型高峰期预测误差较移动平均降低约 35% (MAE) 与 29% (RMSE), 其自回归结构对校园出行强自相关性具有更好捕捉能力。研究可为校园车辆投放优化与动态调度策略提供方法支撑。

关键词: 共享电动车; 潮汐现象; 时空可视化; ARIMA; 需求预测

Short-Term Demand Forecasting for Campus Shared Electric Bicycles by Integrating Spatial Heatmaps and ARIMA Models

Wu Yanjie, Deng Lin*

School of Computer Science, Wuhan East Lake College, China Hubei Wuhan 430212

Abstract: The borrowing and returning behaviors of shared electric bicycles on campus are driven by both daily schedules and functional area layouts, exhibiting significant spatial tidal patterns during morning and evening rush hours, which leads to localized vehicle shortages and increased maintenance costs. Based on simulated order data, this study establishes an analytical framework of "spatial visualization—temporal modeling—predictive comparison": spatially, grid-based statistics and kernel density estimation are employed to generate borrowing heatmaps, with normalized tidal difference indicators identifying supply-demand imbalance zones; temporally, hourly demand sequences are established for functional areas such as dormitories, classrooms, and cafeterias, and the predictive accuracy of moving average and ARIMA models is compared with one-hour lead time. The results demonstrate that the tidal variations between the dormitory and teaching zones exhibit the most pronounced differences. The ARIMA model achieves approximately 35% (Mean Absolute Error, MAE) and 29% (Root Mean Square Error, RMSE) lower prediction errors during peak periods compared to the moving average method, with its autoregressive structure demonstrating superior capability in capturing the strong autocorrelation of campus traffic patterns. This study provides methodological support for optimizing vehicle deployment and developing dynamic scheduling strategies in campus environments.

Keywords: Shared electric bicycles; Tidal phenomenon; Spatiotemporal visualization; ARIMA; Demand forecasting

0 引言

共享电动车因其便捷性与覆盖性, 在高校校园内日益成为学生短距离出行的主要方式。与城市开放道路环境相较于, 校园共享电动车具有封闭场景、功能区集中、出行规律性强等特点, 因而车辆借还行为更容易呈现时空聚集, 形成明显的潮汐现象^[1]。较为典型的具体体现为: 早晨宿舍区集中借车、教学区集中还车; 晚间趋势反向, 教学区集中借车、宿舍区集中还车。车辆潮汐导致部分区

域出现“无车可骑”, 而部分区域出现“车辆堆积”, 影响用户体验并增加人工调度压力。

近年来, 国内外学者针对共享出行系统的时空特征开展了大量研究。Ma 等设计基于时空图注意力 LSTM 的短时需求预测分析方法, 通过融合多源数据提高预测分析精度; Sohrabi 与 Ermagun^[2]选用时空模式检测方法动态预测分析共享单车流量; 国内学者柯日宏等设计基于 KNN-LightGBM 的租还需求预测分析方法识别潮汐点^[3]。然而,

现有研究多集中于城市开放道路的共享单车系统，校园场景在区域尺度、出行目的、管理目标方面存在明显差异：校园空间范围有限但功能区高度集中，出行行为强依赖于课程时间表，且管理方更关注高峰时段的短时预测分析而非全天预测分析。此外，现有方法多依赖深度学习模型，存在参数复杂、可解释性差、数据需求量大的问题，不利于校园管理方的快速部署^[4]。

针对上述研究不足，本文围绕校园共享电动单车为研究对象，设计一种轻量化的“可视呈现识别—规律提取—短期预测”的分析框架。本文的主要工作如下：

(1) 可视化环节，先用网格热力图把借还车的空间热点铺开来看；再计算潮汐差异指标，标出哪些格子车多了、哪些格子空了。

(2) 预测环节，按宿舍、教学楼、食堂三类区域，按小时统计用车量；用移动平均和 ARIMA 两种模型做对比，看在短时预测中谁更准。

(3) 验证环节，因真实数据难以获取，所以本研究用模拟数据跑实证，这样做的优势是生成规则透明并且能复现。

1 数据来源与预处理

1.1 数据来源

作者以武汉东湖学院为蓝本，把课表、校园地图和学生日常出行方式放到一起，用随机过程生成了一批仿真数据。具体做法如下：

(1) 基础参数：武汉东湖学院校园总面积约 5594.68 亩，师生规模约 12000 人，假设投放 400 辆车，模拟跑 30 天（其中工作日与周末区分开来），每天产生约 800 个订单。

(2) 时空规律：按小时生成订单，早 7-9 点宿舍区借车扎堆，数量是平时的 3.8 倍，教学区还车集中，约为 2.6 倍；中午食堂最忙，借、还量均翻两倍；晚上反过来，教学区借车的多、宿舍区还车的多。

(3) 订单属性：单车用车时长大多 20 分钟左右，路程按直线距离再加 20% 进行浮动。用户编号从 1 排到 12000，时间单位为分钟。

1.2 研究区域概况

武汉东湖学院校区大体上呈长方形，从功能上将分为教学区、宿舍区等五块区域，具体见图 1。宿舍区在西北角，8 栋公寓约 7000 人。早晨上完课，车基本被借光；晚上下课，车又归还回来；教学区有 3 栋教学楼、2 栋实训实验楼，位于学校的中部，潮汐方向与宿舍相反。图

书馆区情况特殊，在中午、晚上各有一波学生流高峰。食堂区位于宿舍与教学区之间，受到学生上课时间的影响，11:30-13:00 最堵，车辆周转变慢。体育馆在东南角，18:00-21:00 车辆借还活跃。

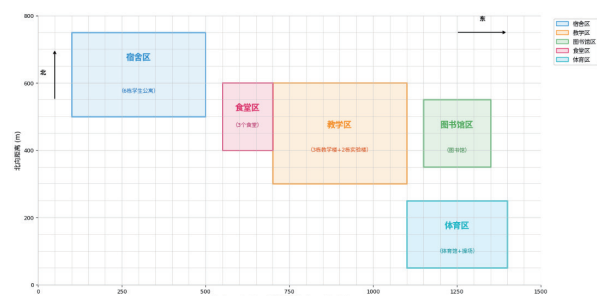


图1 校园功能区划分与空间网格化示意图

(网格大小: 50m × 50m)

1.3 数据清洗

在数据清洗方面，作者删除坐标缺失 (<0.1%) 及越界点位，以及车辆借还时长小于 1 分钟或大于 120 分钟的订单，之后得到有效订单记录 23052 条，时间统一为 24 小时制，工作日与周末分层，按小时粒度进行汇总。

2 潮汐现象的时空可视化分析

2.1 时段划分与出行特征

作者按照武汉高校普遍的课表作息，把一天分成五个时间段来看用车规律：

早高峰 (7:00-9:00)：早上 1-2 节课，学生从宿舍赶去教学楼，借车点集中在宿舍区，还车点集中在教学区。

午休时段 (11:00-13:00)：下课吃饭，路线比较乱，有人直奔食堂，有人先回宿舍，三个区域都有人流。

下午下课 (14:00-17:00)：第 5 到 8 节课不集中，出行分散，没有明显高峰。

傍晚回流 (17:00-19:00)：晚自习前，学生从教学楼回宿舍，方向和早上相反。

夜间小高峰 (21:00-23:00)：晚自习和图书馆关门后，一批人从图书馆出来往宿舍走，形成次高峰。

2.2 校园的借、还车热力图分析

基于网格统计各时段借还车频次，选用核密度估计 (KDE) 方法生成热力图。颜色刻度采用分级设色：蓝色 (0-5 次)、黄色 (6-15 次)、橙色 (16-30 次)、红色 (>30 次)。晚高峰趋势与早高峰相反：教学区成为借车高值区 (35 次/网格)，宿舍区成为还车高值区 (33 次/网格)，两者均落入红色区间，呈现出从教学区向宿舍区的“回流”特征。早、晚高峰的热力图如图 2 和图 3 所示：

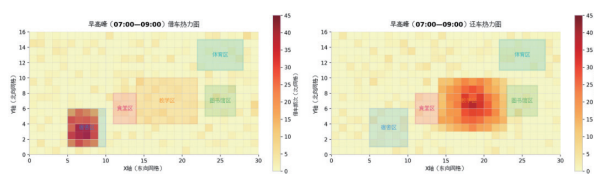


图2 早高峰（07:00—09:00）借车与还车热力图

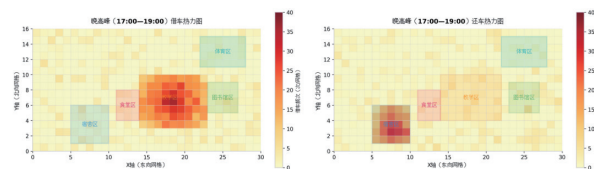


图3 晚高峰（17:00—19:00）借车与还车热力图

2.3 潮汐差异指标与差异图

现有研究多聚焦空间热点的识别，对热点的“性质”关注不足，即这个区域是车多还是车少。王伟地等^[4]采用DBSCAN聚类提取热点，但实际使用时候存在两点问题：一是聚类轮廓随密度阈值波动较大，二是聚类结果只说明热度，不区分是借车热还是还车热。本文改走比值法路线，参考生态学群落优势度指数构造 $T(i,t)$ ：分子取还借车量之差，分母取两者之和加1（避零除），+1附近意味着车辆淤积，-1附近意味着车辆断供，经测试，选取绝对值0.6作为预警线。

图4呈现潮汐“昼夜颠倒”。早高峰宿舍区 T 值 -0.85 ，深蓝，车被借空；教学区 $+0.72$ ，红成一片。食堂区夹在中间，绿色过渡。午间食堂 $T \approx +0.65$ ，堵约一小时。晚高峰倒过来，但教学区流出强度 $|T|$ 比早高峰流入低0.1左右——晚上不是所有学生都直接回宿舍，有人留下来晚自习，回流自然平缓。

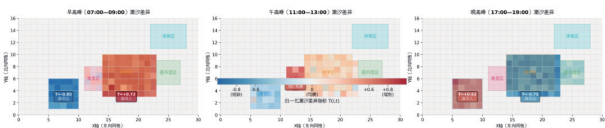


图4 不同时段潮汐差异空间分布图

2.4 轨迹预测流向分析

为进一步看清车辆在各区域间的流动规律，作者对每笔订单的起点和终点进行配对，提取出高频出行路线。早高峰与晚高峰主要轨迹如图5所示，图里只保留每小时出现15次以上的主流路径，线条越粗，代表该路线人流量越大。



图5 早高峰与晚高峰主要轨迹预测流线图

3 潮汐需求预测模型

3.1 需求时间序列构建

为观察各功能区需求波动，作者把30天订单按小时汇总，宿舍区、教学区、食堂区、图书馆区各算一条时间序列。每个区域720个点，四组数据放一起比。校园出行峰谷落差大，原始数据波动剧烈。先做对数变换 $(\ln(Dz(t)+1))$ ，压极端值，缓解异方差；随后采用ADF单位根检验验证平稳性，结果显示，在5%的显著性水平下，各区域序列均拒绝单位根假设，满足后续建模的平稳性要求。

3.2 预测模型

3.2.1 移动平均模型

移动平均模型是时间序列预测中最基础的方法之一，核心思想是用过去一段时间的平均值来预测未来。作者选用简单移动平均方法作为基准模型：

$$\hat{D}(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D(t-i)$$

其中参数 $k=3$ ，表示取最近3个小时的数据算平均值，作为当前或下一个小时的预测值。这个模型默认短时间内需求变化不大，适合用来预测非高峰时段。

3.2.2 ARIMA 模型

针对非平稳时间序列，选用差分整合移动平均自回归模型 $ARIMA(p,d,q)$ 。通过以下步骤确定参数：

差分阶数 d ：根据 ADF 检验结果，原始序列非平稳，开展一阶差分后平稳 ($d=1$)；

阶数 p,q 确定：观察 ACF/PACF 图，结合 AIC (Akaike Information Criterion) 与 BIC 准则开展网格搜索，最终确定宿舍区、教学区最优参数为 $ARIMA(2,1,2)$ ，食堂区为 $ARIMA(1,1,1)$ ，图书馆区为 $ARIMA(1,1,2)$ ，ARIMA 模型形式为：

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)D(t) = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2)\varepsilon(t)$$

公式里的 L 代表滞后算子， ϕ 代表自回归系数， θ 代表移动平均系数， $\varepsilon(t)$ 代表白噪声扰动。

3.3 评价指标

本文选用平均绝对误差 (MAE) 与均方根误差 (RMSE) 评价预测分析效果：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i - \hat{D}_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \hat{D}_i)^2}$$

其中 n 为测试集样本量。预测误差之外，模型对数据时序特征的提取充分性也需验证^[5]。残差 Ljung-Box 检验显示， p 值大于 0.05 时，残差序列近似白噪声，自相关结构未显遗漏，拟合可认为是充分的。

4 实验与结果分析

4.1 实验设置

验证模型实际效果需要明确的实验步骤。作者将数据按时间顺序分成两部分：前面 24 天用来训练模型，后面 6 天用来测试预测准确度。这样正好跨过一周，能看看模型在工作日和周末的表现是不是都稳定。具体实现用 Python 3.9，ARIMA 模型直接调 statsmodels 库的现成方法，误差计算用 scikit-learn 的 RMSE 和 MAE。最后要做的，就是根据每个区域过去几小时的借车数量，算出下一小时大概需要多少辆车，给调度提供参考。

4.2 可视化结果分析

宿舍区单向流动特征最突出。早高峰借还比 4.2:1，车辆向教学区迁移；晚高峰还借比 3.8:1，形成显著淤积，弹性停车区可缓解占道压力。教学区净流入比 3.5:1，且存在课间脉冲，09:00—09:10、15:00—15:10 各出现短时用车高峰。楼宇间布设微型调度点，以小批量、高频次替代大规模转运更为灵活。食堂区周期短，11:30—12:00 涌入、12:00—13:00 流出，一小时转一圈，提前半小时预警可留足调度窗口。图书馆离校高峰较教学区延迟 1—2 小时，教学区高峰后将富余车辆前置至宿舍区，可利用时序差错峰再平衡。

4.3 预测结果分析

表1 各功能区不同模型预测误差对比（提前1小时预测）

区域	模型	MAE (辆/小时)	RMSE (辆/小时)	较MA改进率
宿舍区	移动平均	4.82	6.24	—
宿舍区	ARIMA(2,1,2)	3.11	4.43	35.4%/29.0%
教学区	移动平均	5.15	7.01	—
教学区	ARIMA(2,1,2)	3.58	5.08	30.5%/27.5%
食堂区	移动平均	6.23	8.45	—
食堂区	ARIMA(1,1,1)	4.89	6.72	21.5%/20.5%
图书馆区	移动平均	3.45	4.88	—
图书馆区	ARIMA(1,1,2)	2.67	3.95	22.6%/19.0%

结果显示：

- (1) ARIMA 模型在所有区域均优于移动平均模型，MAE 减少 21.5%—35.4%，证明差分处理能有效捕捉校园出行需求的非平稳特征；
- (2) 宿舍区与教学区预测分析精度最高（MAE<3.6），因其需求模式强依赖于课程时间表，规律性明显；食堂区

预测分析误差相对较大（MAE=4.89），因其受随机因素（如菜品质量、天气）影响更大，见图 6 所示；

- (3) 残差 Ljung-Box 检验结果：各区域模型 p 值均 >0.05（宿舍区 $p=0.34$ ，教学区 $p=0.28$ ），说明残差序列为白噪声，模型充分提取了数据中的时间依赖结构。

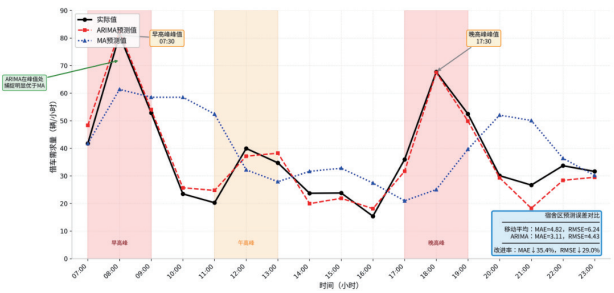


图6 宿舍区某工作日预测值与实际值对比

4.4 预测效果时段分异分析

进一步将测试集按时段划分，分析模型在不同时段的适用性（以宿舍区为例）：

表2 宿舍区不同时段预测MAE（单位：辆/小时）

时段	移动平均	ARIMA	提高幅度
07: 00—09: 00	8.35	4.22	51.1%
11: 00—13: 00	5.13	3.89	25.7%
17: 00—19: 00	7.99	4.46	42.3%

5 结语

针对校园共享电动车“早高峰无车可借、晚高峰无处可还”的调度难题，本研究融合空间热力图与 ARIMA 时序模型，提出一套轻量化分析方案。研究首先构建归一化潮汐差异指标 $T(i,t)$ ，以 ± 0.6 为预警阈值，有效识别车辆堆积与短缺风险，为网格化运维提供量化决策锚点；进而采用 ARIMA(p,1,q) 模型进行提前 1 小时需求预测，较基准模型误差降低 21.5%—35.4%，早晚高峰时段优化幅度超 40%。这是一种轻量级的解决方案：用热图摸清车辆“在哪儿扎堆”，用 ARIMA 模型预判“何时用车”。计算量小、好解释，适合高校在算力和数据都有限的情况下，做短时调度的决策参考。

参考文献：

[1] MA X, YIN Y, JIN Y, et al. Short-term prediction of bike-sharing demand using multi-source data: A spatial-temporal graph attentional LSTM approach[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1161.

[2] SOHRABI S, ERMAGUN A. Dynamic bike sharing traffic prediction using spatiotemporal pattern detection[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 90: 102647.

[3] 柯日宏, 吴升, 柯玮文. 一种识别共享单车潮汐点的时空模型和基于 KNN-LightGBM 的租还需求预测分析方法[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(4): 741-753.

[4] 王伟地, 杨敏, 陈峻等. 校园无桩共享单车时空动态需求预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 45-51.

[5] 张腾飞, 袁鹏程. 基于 ARIMA 的短时交通量预测

模型[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(7): 273-278.

作者简介: 吴妍洁(2005.04-), 女, 汉族, 湖北, 专科, 研究方向: 大数据, 机器学习。

* 通讯作者: 邓林(1993.12-), 男, 汉族, 湖北, 本科, 研究方向: 大数据, 机器学习, 邮箱: 278818174@qq.com。