

# 基于数学建模的休闲农业景区交通流量管控与优化研究

黄冉

成都农业科技职业学院, 四川 成都 611130

**摘要:** 针对休闲农业景区旅游高峰期交通拥堵问题, 以我国西南地区某典型农业旅游小镇为研究对象, 运用数学建模方法研究交通流量管控与优化策略。首先, 利用 K-Means 聚类将一日车流量划分为 4 个特征时段, 估算得到早高峰东西向右转比例高达 40.81%; 其次, 基于 M/M/1 排队论构建车辆延误模型, 采用遗传算法对 12 个交叉口信号灯配时进行全局优化, 有效降低了系统总延误; 再次, 通过轨迹行为识别巡游车辆, 结合排队论估算出黄金周期间, 景区内任意时刻平均需为巡游车辆提供约 38 至 52 个临时停车位; 最后, 利用车流量变化模型评估临时管控措施效果, 结果显示核心路段车道利用率明显下降, 其中锦华大道中段由超过 5 降至约 4.2。本研究为休闲农业景区交通管控提供了量化决策依据, 是高职数学“产教融合”服务乡村振兴的实践案例。

**关键词:** 休闲农业景区; 交通流量优化; K-Means 聚类; 排队论; 遗传算法

DOI: 10.64649/yh.jydk.issn3080-2660.202605032

## 0 引言

休闲农业旅游快速发展, 但旺季自驾车流短时集中, 导致景区周边道路拥堵、停车困难。现有研究多聚焦城市交通, 缺乏对乡镇农业旅游交通问题的深入探索。为此, 本研究以西南地区某典型农业旅游小镇为例, 建立一套基于实际数据的交通建模方法。主要工作包括: 用 K-Means 聚类划分时段并估算转向比例; 用 M/M/1 排队论和遗传算法优化信号配时; 识别巡游车辆并预测临时停车位需求; 评估临时管控措施效果。研究为景区交通管理提供量化工具, 并为高职数学课程评价改革提供真实情境的实践案例。

## 1 数据来源

本研究使用的交通流数据来源于四川省某休闲农业旅游小镇景区管理部门在旅游高峰期部署的卡口监控系统记录, 包括车辆通过时间、车牌号、行驶方向、所在交叉口等信息。经脱敏处理, 共获取该镇两条主干道锦华大道、蜀南路沿线 12 个交叉口在旅游高峰前后连续 15 天的有效记录, 数据总量约 92 万条。数据采集时间为 2025 年 4 月至 5 月, 覆盖五一黄金周前后。

## 2 交通流时段划分与转向特征分析

基于监控数据, 本节首先对车辆轨迹进行转向判别, 然后利用 K-Means 聚类划分一日内的特征时段, 最后统计各时段的转向比例。

### 2.1 转向判别规则

由于监控设备安装在交叉口停车线后方, 无法直接记录车辆通过后的转向。本文通过关联同一车辆在相邻两个交叉口的行驶方向来判断转向。方向编码 1、2、3、4 分别代表东向西、

西向东、南向北、北向南。判别规则如下: 直行(当前方向与下一方向相同); 左转(方向按顺时针变化  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ ); 右转(方向按逆时针变化  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ )。若两次记录的时间间隔超过 30 分钟, 或无法匹配到下一记录, 则标记为“无法判断”。该规则用于后续转向比例统计。

### 2.2 基于 K-Means 聚类的时段划分

为刻画车流量随时间的变化规律, 采用 K-Means 聚类<sup>[3]</sup>对全天 24 小时进行时段划分。将每小时通过锦华大道与蜀南路交叉口的总车流量作为特征, 得到序列  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为消除量级影响, 先进行 Z-score 标准化:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

其中,  $\mu$  是数据的均值,  $\sigma$  是数据的标准差。

K-Means 的目标是将 24 个样本点划分到 K 个簇中, 使簇内平方和最小:

$$\min \sum_{j=1}^K \sum_{z \in C_j} \|z - u_j\|^2 \quad (2)$$

采用肘部法则与轮廓系数联合确定最佳聚类数 K。利用 Python 软件作出锦华大道与蜀南路交叉口全天车流量折线图, 见图 1。可以看出车流量有明显的波动特征, 存在多个高峰时段。

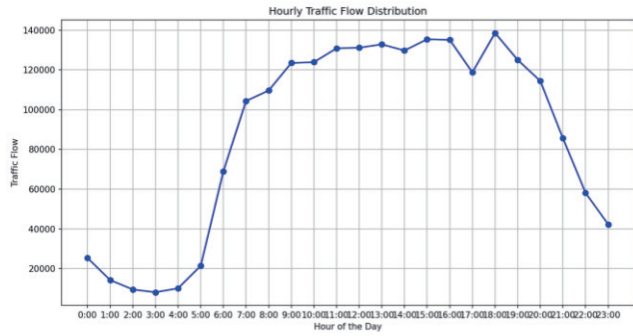


图1 锦华大道-蜀南路交叉口车流量折线图

为进一步量化时段划分，计算不同K值下的簇内误差平方和，下降趋缓的“拐点”对应候选K值；轮廓系数  $s(i)$  综合衡量聚类质量，公式如下：

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))} \quad (3)$$

整体轮廓系数取所有样本均值。计算结果如图2、图3所示，K=4时轮廓系数最大，且肘部在K=4处出现明显拐点，因此将全天划分为4个特征时段。

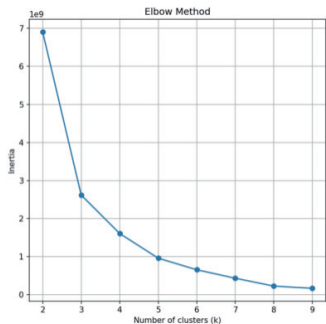


图2 肘部法则图

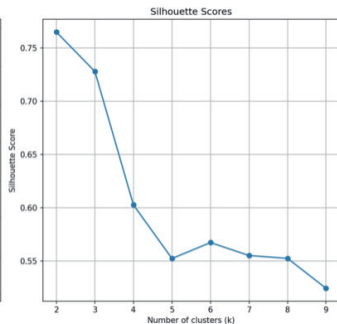


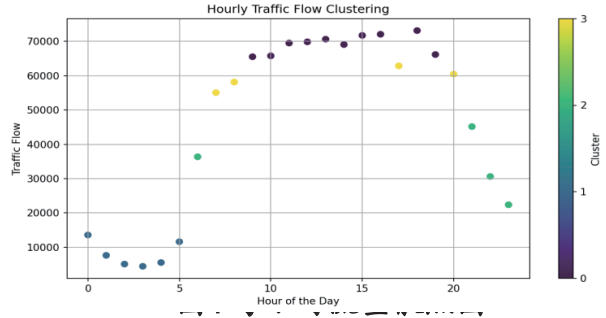
图3 轮廓系数图

聚类结果如表1所示。

表1 K-Means聚类时段划分结果

聚类编号	时段范围	流量特征
0	00:00-05:00	凌晨低流量
1	06:00-12:00	早高峰
2	13:00-18:00	下午高峰
3	19:00-23:00	傍晚中流量

凌晨时段车流量极低，对信号灯优化无实际意义，因此后续的转向比例分析和信号配时优化仅针对早高峰、下午高峰和傍晚三个时段。图4为每小时流量散点图，直观展示了各小时流量的分布。



### 2.3 各时段转向比例统计

针对每个时段，统计锦华大道与蜀南路交叉口各方向的转向数量，计算右转、左转、直行的比例。计算公式为：

$$P_{右} = \frac{N_{右}}{N_{右} + N_{左} + N_{直}} \quad (4)$$

上式左转、直行同理。图5以“由东向西”方向为例，展示了三个时段的转向流量构成。

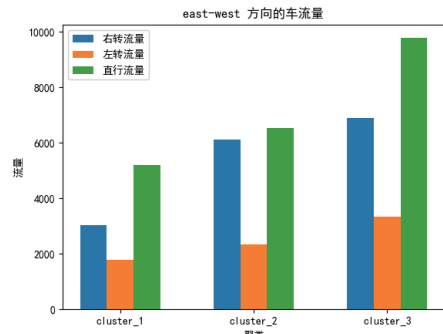


图5 东向西方向车流量（转向构成）

详细数据见表2，聚类0（凌晨时段）因流量极低未列入转向分析。

表2 景区一日交通流量聚类分析表——时段与转向比例

聚别类型	方向	右转比例	右转流量	左转比例	左转流量	直行比例	直行流量
聚类1 (低流量-早高峰)	由东向西	30.18%	3018	17.8%	1782	51.99%	5199
	由西向东		3621		2138		6239
	由南向北		3320		1960		5719
	由北向南		3923		2317		6759
聚类2 (高流量-早高峰)	由东向西	40.81%	6120	15.6%	2340	43.59%	6538
	由西向东		7344		2808		7846
	由南向北		6528		2496		6974
	由北向南		6936		2652		7410
聚类3 (高流量-下午高峰)	由东向西	34.39%	6878.0	16.7%	3348.0	48.86%	9772.0
	由西向东		7565.8		3682.8		10749
	由南向北		7221.9		3515.4		10260
	由北向南		7909.7		3850.2		11237.8

将三个时段的平均小时流量、流量等级、主导流向和核心特征汇总，得到景区一日交通

流量特征总览表(表3)。

表3 景区一日交通流量特征总览表

时段聚类	平均总流量	流量等级	主导流向	核心特征
早高峰前期(低流量)	约 11500	低	直行(51.99%)	流量平稳,直行为主
早高峰核心期(高流量)	约 16500	中	右转(40.81%)	右转激增,通勤需求集中
下午高峰期(高流量)	约 21500	高	直行(48.86%)	流量最大,返程高峰

由表2、表3可见,景区周边交通流量有明显的时段差异和方向不均衡特征,早高峰右转比例高达40.81%,显著高于傍晚30.18%和下午高峰34.39%,表明大量车辆在早高峰从主干道右转进入景区停车场或周边道路;直行比例在傍晚时段最高51.99%,反映正常通勤车流;下午高峰直行比例为48.86%,返程特征明显。上述时段划分及转向比例为信号灯配时优化提供了基础数据支撑。

### 3 信号灯配时优化

为提升主干道通行效率,本节基于M/M/1排队论建立车辆延误模型,并采用遗传算法对锦华大道与蜀南路沿线12个交叉口的信号灯配时进行全局优化。

#### 3.1 延误模型构建

将每个交叉口的每个行驶方向视为一个独立的单服务台排队系统<sup>[5]</sup>,即M/M/1模型<sup>[1]</sup>。车辆到达服从参数为 $\lambda$ 的泊松分布,交叉口服务(车辆通过)服从参数为 $u$ 的指数分布。方向 $i$ 上的平均车辆延误<sup>[2]</sup>时间 $D_i$ 可近似表示为:

$$D_i = \frac{Q_i \times W_i}{G_i} \quad (5)$$

式中, $Q_i$ 是方向 $i$ 的每小时车流量(辆/小时),由第三章统计得到; $G_i$ 表示方向 $i$ 的绿灯时长(秒); $W_i$ 是方向 $i$ 的综合权重,综合考虑车流量与路段长度:

$$W_i = a \cdot Q_i (1-a) \cdot L_i \quad (6)$$

其中 $L_i$ 为方向 $i$ 对应路段的长度(km), $a$ 为平衡系数,用于调节车流量与路段长度在权重中的相对重要性。系统总延误为所有方向延误之和:

$$D_{total} = \sum_{i=1}^N D_i \quad (7)$$

其中, $N$ 为所有交叉口方向总数,即12个交叉口 $\times$ 4个方向=48个。

遗传算法的目标是通过调整每个方向的绿灯时长 $G_i$ ,使总延误最小化 $D_{total}$ 。适应度函数取总延误的倒数,即 $F = 1/D_{total}$ ,延误越小适应度越高。

#### 3.2 遗传算法设计

遗传算法通过选择、交叉、变异操作迭代搜索<sup>[4]</sup>最优解。本研究的算法框架如下:每个个体代表一组绿灯时长配置,满足信号周期和各方向最短绿灯约束。适应度函数取系统总延误的倒数 $F = 1/D_{total}$ ,延误越小适应度越高。综合权重计算采用归一化加权形式:

$$W_i = \alpha \cdot \frac{Q_i}{\sum Q_i} + (1-\alpha) \cdot \frac{L_i}{\sum L_i} \quad (8)$$

$Q_i$ 为车流量, $L_i$ 为路段长度, $a$ 为平衡系数( $0 \leq a \leq 1$ ),该权重用于延误公式中的

$$D_i = \frac{Q_i \times W_i}{G_i}$$

依据适应度高低,采用锦标赛法选择优良个体进入下一代;以一定概率对个体进行交叉和变异,增加种群多样性。当达到预设迭代代数或连续多代最优适应度无明显改善时停止。算法输出各时段、各交叉口的最优绿灯配时方案。

#### 3.3 优化结果

该小镇核心景区周边有两条主干道,锦华大道和蜀南路,两条路交叉形成了12个路口,每个路口记录了四个方向(东向西、西向东、南向北、北向南)通过车辆的信息,包括拍摄地点、行驶方向、拍摄时间和车牌号。以早高峰时段为例,图6展示了锦华大道与蜀南路沿线12个交叉口(按由上至下、由左至右顺序依次为:西环路-蜀南路、锦华五路-蜀南路、锦华大道-蜀南路、东环路-蜀南路、蜀南路-景区出入口、锦华三路-蜀南路、锦华四路-蜀南路、锦华一路-蜀南路、锦华二路-蜀南路、锦华大道-蜀南一路、锦华大道-生态路、锦华大道-迎宾路)优化前后的绿灯时长对比。

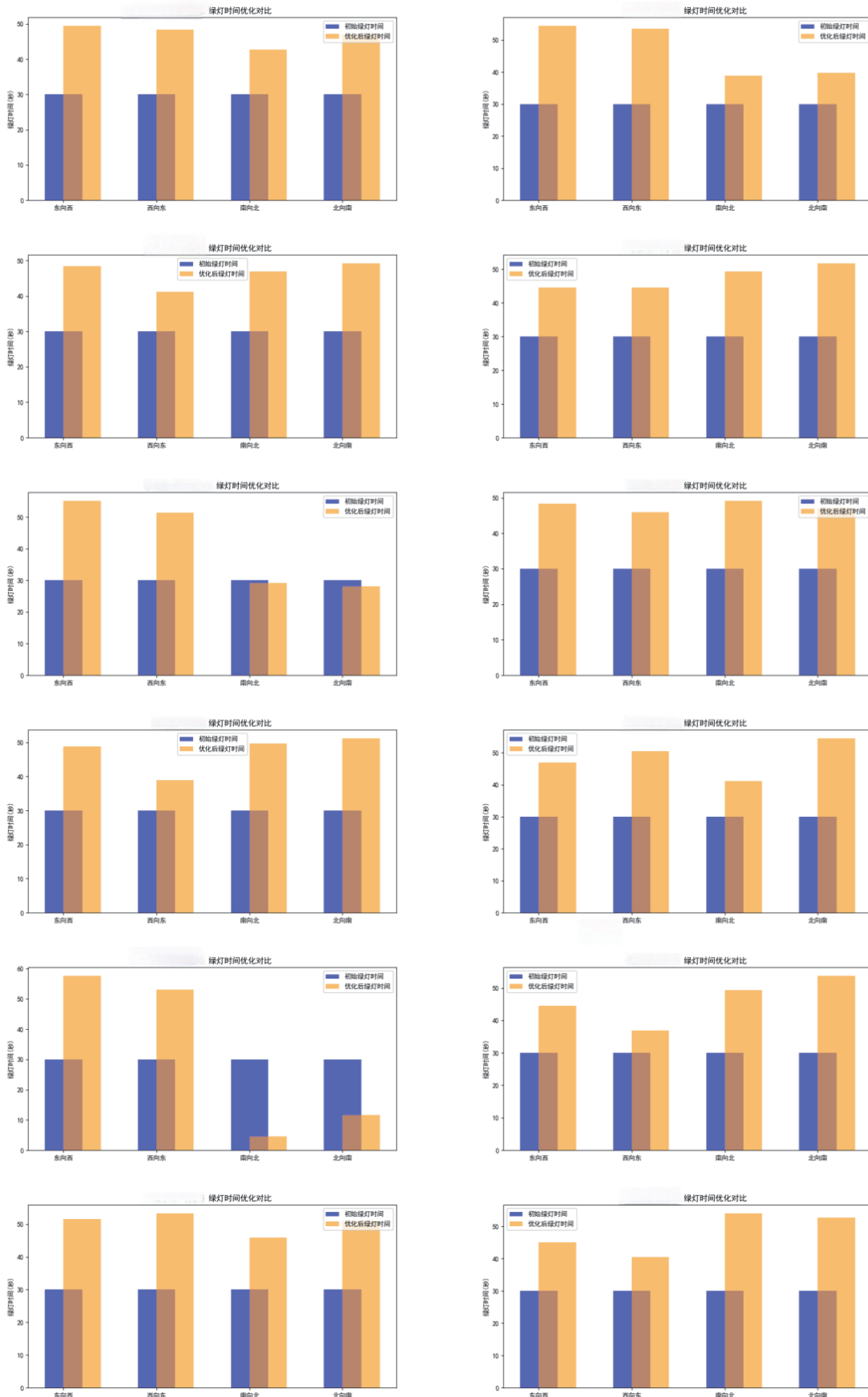


图6 12个交叉口信号灯配时优化前后对比

从图6可以看出，东西向主干道锦华大道直行绿灯时长普遍增加，车流量较大的方向获得更多绿灯时间；南北向蜀南路绿灯时长相应缩短，与车流量较小的实际情况相符；各交叉

口周期保持一致，满足信号协调约束。

### 3.4 效果评估

对比优化前后的系统总延误，早高峰及下午高峰时段延误降幅尤为显著，具体表现为：

东西向主干道车辆平均等待时间明显减少；各交叉口间的信号协调性增强，避免了局部绿灯过长导致相邻交叉口排队溢出；整体路网通行效率提升。优化后的配时方案更贴合实际车流需求，验证了遗传算法在景区交通信号控制中的有效性。

### 4 巡游车辆识别与停车位需求估算

旅游高峰期，大量自驾车辆涌入景区，部分车辆因找不到停车位而在核心路段低速绕行，形成“巡游”行为，进一步加剧了交通拥堵。本节基于车辆轨迹数据，识别巡游车辆，并采用M/M/1排队模型估算临时停车位需求。

#### 4.1 巡游车辆定义与识别

巡游车辆指在景区核心区域锦华大道与蜀南路沿线反复出现、平均速度较低、短时内多次通过同一或相邻交叉口的车辆。这类车辆通常正在寻找停车位，而非正常过境。

识别采用基于时间差的聚类方法。对每辆车按时间排序，计算相邻两次经过监控点的时间差。若某车在短时间内反复出现在景区周边交叉口且轨迹绕行，则判定为巡游车辆。本研究使用MiniBatchKMeans算法<sup>[6]</sup>对时间差和交叉口编码进行聚类，将频繁短时往返的车辆归为巡游车辆。图7展示了不同交叉口巡游车辆的重复出现次数。

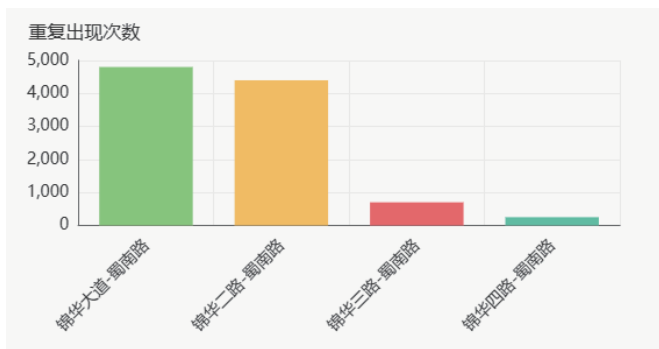


图7 不同交叉口巡游车辆重复出现次数

图8和图9进一步展示了巡游车辆的时间差分布和聚类结果，表明多数巡游车辆的时间差集中在260-420秒之间，峰值出现在300秒附近，说明巡游行为具有较强的周期性。

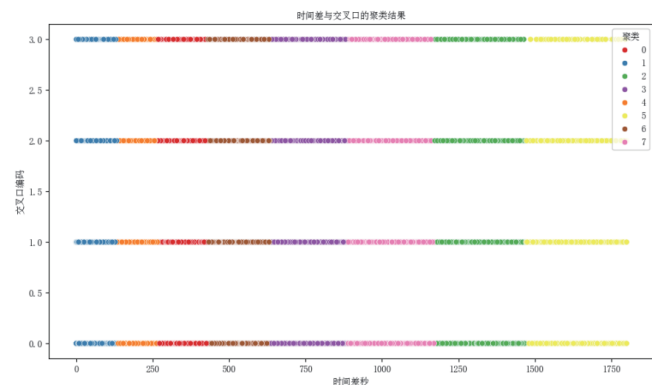


图8 时间差与交叉口聚类结果图

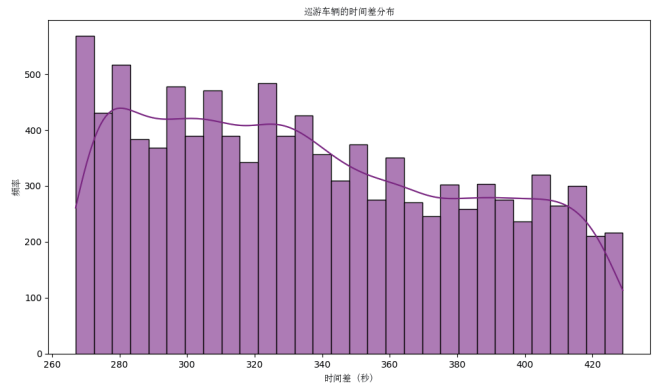


图9 巡游车辆时间差分布图

行驶方向统计显示，巡游车辆中右转占58.7%，左转占41.3%，见图10。与景区停车场主要分布在道路右侧的实际情况相符。

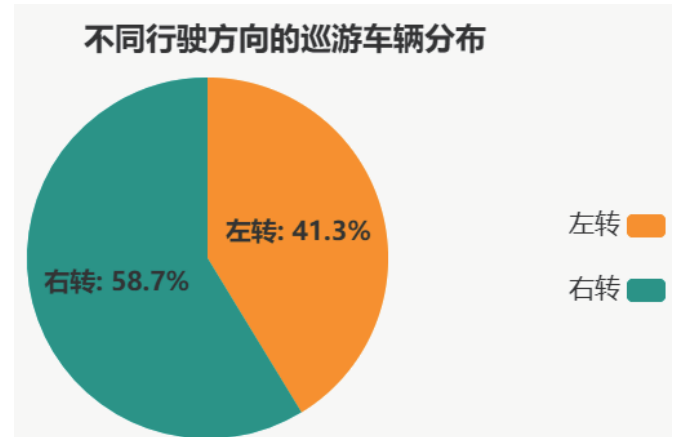


图10 不同行驶方向的巡游车辆分布图

#### 4.2 停车位需求模型

将景区停车场视为一个M/M/1排队系统。设巡游车辆到达率为 $\lambda$ （辆/秒），平均每辆车停车时长为 $\frac{1}{u}$ （秒），则服务率 $u$ （辆/秒）。系统稳定时，平均需要的停车位数量为：

$$L = \frac{\lambda}{u - \lambda}, \quad \lambda < u \quad (9)$$

实际计算中， $\lambda$ 取黄金周期间每日识别的巡游车辆总数除以24小时（86400秒）；停车时长根据景区调查数据，取平均30分钟（即1800秒），故 $u = \frac{1}{1800}$ 辆/秒。

#### 4.3 估算结果

对五一黄金周5天的数据分别计算，得到每日巡游车辆总数及所需临时停车位数量，如表4所示。该结果为巡游车辆排队模型的输出，未包含常规过境车辆停车需求。

表4 假期每日车位需求表

假期天数	巡游车辆总数(辆)	估算停车位需求(个)
第一天	1950	40.6
第二天	2330	48.5
第三天	2474	51.5
第四天	1803	37.6
第五天	2147	44.7

从表中可以看出，黄金周期间每日巡游车辆总数在1803-2474辆之间，由排队模型计算出的平均同时需要占用的临时停车位约37.6-51.5个，取整约38-52个。

需要说明的是，第三章中早高峰时段路网流量大，而本节的巡游车辆和停车位需求数值相对较小，两者并不矛盾。原因在于：路面上的车流大部分是直行过境车辆（早高峰直行比例为43.59%），它们只是经过景区，并不需要停车；而巡游车辆是找车位的车辆，排队模型计算的是任意时刻平均有多少辆车同时占用车位，而非全天累计需求量。两者衡量的不是同一件事，所以数值的量级差异是完全合理的。

### 5 临时管控措施效果评估

五一黄金周期间，该小镇对景区周边道路实施了临时交通管制措施，管控路段可根据车流量临时禁止或限制通行，车辆须按指定路线及现场交警指挥通行。本节基于管控前后的车流量数据评估措施效果。

#### 5.1 评估指标

采用车流量变化率(10)式和车道利用率(11)式两个量化指标：

$$\Delta = \frac{V_{后} - V_{前}}{V_{前}} \times 100\% \quad (10)$$

其中  $V_{前}$ 、 $V_{后}$  分别为管控前后同一交叉口的车流量。

$$\text{车道利用率} = \frac{\text{实际车流量}}{\text{理论通行能力}} \times 100\% \quad (11)$$

上式中，设定城市道路的单车道通行能力取800辆/小时。

#### 5.2 对比分析

图11展示了五一前后东环路-蜀南路、西环路-蜀南路、锦华大道-迎宾路、锦华大道-生态路、锦华大道-蜀南路各交叉口车流量变化百分比。从图中可以看出，管控后部分核心交叉口车流量呈下降趋势，表明管控措施对分流车辆起到了作用。

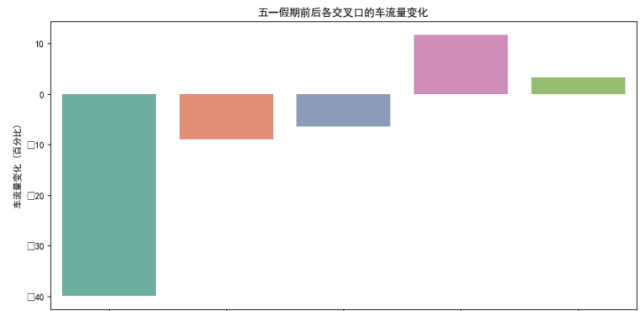


图11 五一假期前后交叉口车流量变化图

使用Python绘制五一前后交叉口车流量变化趋势折线图，x轴为交叉口，y轴为车流量。如图12，核心交叉口在管控后流量有所降低，而周边绕行道路流量略有增加，显示出车辆重新分布的特征。

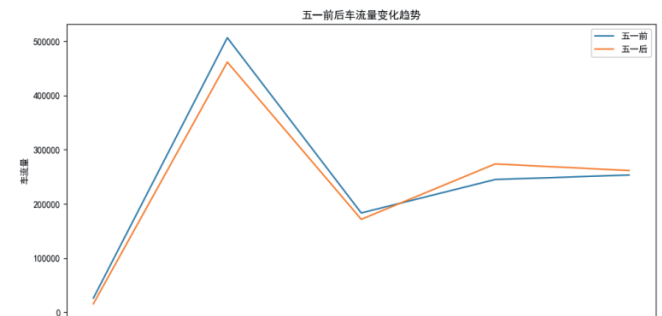


图12 五一前后车流量变化趋势折线图

车道利用率方面，图13（普通休息日）与图14（黄金周）进行了对比。图13中，锦华大道中段车道利用率峰值超过5；图14中，同一路段峰值降至约4.2。降幅明显，说明管控措施有效减轻了核心路段的饱和压力。

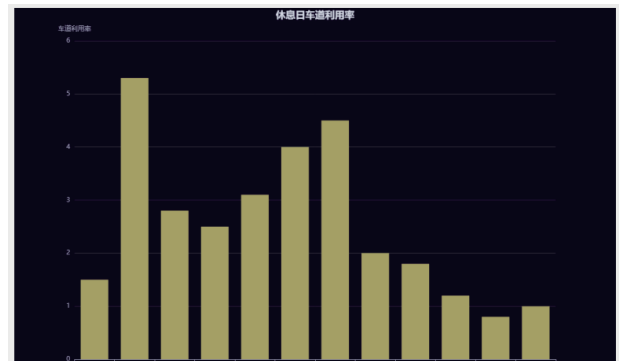


图13 五一休息日车道利用率

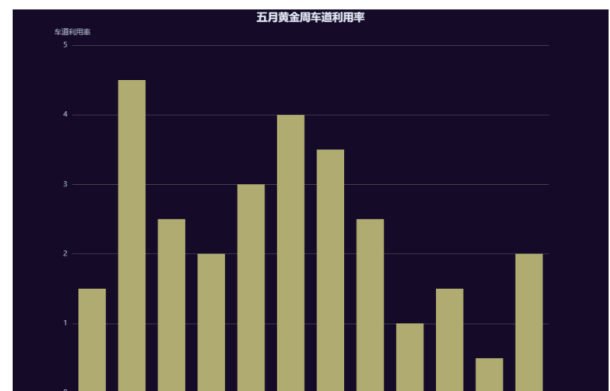


图14 五月黄金周车道利用率

### 5.3 主要发现

通过数据对比,有以下主要发现:休息日峰值位于锦华大道中段( $>5$ ),次高峰在锦华大道东段( $>4$ );黄金周峰值同为锦华大道中段但降至约4.2,核心路段压力缓解。最低利用率点休息日在锦华大道北入口(接近0),黄金周在锦华大道东南段(接近0),假期车流分布不同。中等利用率路段(3-4)休息日有锦华二路西段、锦华三路西段等;黄金周集中在锦华大道中段和锦华二路西段,整体分布更均匀,车流更分散,管控见效。

因此,五一黄金周期间的临时交通管控措施取得了预期效果,显著降低了景区核心路段的交通负荷,提高了道路通行效率。该评估结果为今后重大节假日交通管理提供了数据支撑和决策参考。

### 参考文献:

- [1] 任文喜. 车辆驱动式信号交叉口交通流排队模型及性能分析 [D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2025.
- [2] 王礼平, 王观凤. 超前进位加法器的延迟时间公式与优化设计 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, (04):585-588.
- [3] 李伟龙, 张晓晴, 胡雅洁, 潘旭新, 刘亚男, 张师. 基于K-means聚类算法的负荷峰谷时段划分 [J]. 电气开关, 2024, 62(04): 29-31.
- [4] 蒋鹏程, 薛羽. 基于排序得分预测的演化神经架构搜索方法 [J]. 计算机学报, 1-16.
- [5] 蒋毓灵, 刘力维. 带有N策略, 启动时间和服务台故障的M/M/1排队的均衡策略 [J]. 应用数学, 2021, 34(02): 408-418.
- [6] 宋怡帆. 基于聚类和Python语言的深圳市城市道路车辆行驶工况构建 [D]. 长安大学, 2018.

**作者简介:** 黄冉(1990.10—), 女, 汉族, 四川省乐山人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 函数逼近论。

**项目信息:** 教育评价改革研究基地(四川)2025年度专项课题, “核心素养视域下高职高等数学课程命题评价体系重构与实践研究”(编号: 2025JPG-CDNYKJZYXY-002)。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

本文以某休闲农业旅游小镇为案例, 基于卡口监控数据, 建立数学建模方法研究景区交通流量管控与优化, 主要结论如下: 利用K-Means聚类将一日车流量划分为4个特征时段, 早高峰东西向右转比例高达40.81%, 反映了景区停车吸引特征; 基于M/M/1排队论和遗传算法优化12个交叉口信号配时, 早高峰及下午高峰总延误降低, 通行效率提升; 通过轨迹聚类识别巡游车辆, 采用M/M/1模型估算出黄金周期间任意时刻平均约有38至52辆巡游车辆需要临时停车位; 评估临时管控措施效果, 核心路段车道利用率由超过5降至约4.2, 车流分布更均匀, 措施有效。

### 6.2 展望

模型未来可引入天气、事故等实时数据与多目标优化, 并开发面向基层管理人员的简易工具, 提升模型的实用性和可推广性。