

基于加权估计模型的交通流量管控优化研究

摘 要

在某小镇热门景区周边，游客车辆的涌入以及因寻找停车位引发的拥堵加剧了交通流量管控的难度，尤其是在五一黄金周期间，显著影响了道路的通行效率。本文通过统计分析交通流量数据，建立加权调整概率分配的车流量估计模型，通过线性规划优化信号灯配置，判断巡游车辆预测停车位需求量，量化评价五一临时管控措施效果。

针对问题一，主要解决了一天时段划分问题，估计出不同时段不同相位车流量。首先以小时为时间窗口，将预处理好的车辆信息转换为车流量数据，绘制趋势图可视化车流量差异。接着使用 K-means 算法和小波分析进行分段，发现将一天时间分为 3 段最为恰当。建立加权调整概率分配的车流量估计模型，对 3 个时间段中四个方向的车流量统计分组，基于历史研究资料确定直行、左转和右转的基本概率分别为 60%、15%和 25%，再结合题中数据进行影响权重计算，数字归一化处理后估算出车流量，最后得到每段时间内 4 个相位（包括四个方向直行、转弯）的车流量估计值，具体结果见文中表 5。

针对问题二，将最大化车辆平均速度条件下，信号灯配置优化问题转换为绿灯合理配时问题，本文假设信号灯的一个周期为 120 秒，基于上一问使用的车流量估计模型，构建车流量比例分配函数计算绿灯时间，结果不佳；加入考虑交叉口之间的距离，将约束条件转化为最小化总延误时间，假设黄灯配时为固定的 5s，建立了线性规划模型进行优化求解，得到每个交叉口最佳绿灯配时，且结果符合实际，12 个信号灯的绿灯配时分布在 25s 到 40s 内。

针对问题三，通过分析寻找停车位的巡游车辆的行为特征，提取五一期间车辆信息所对应的特征数据，确定时间与空间上的判定条件，选择景区周围四个交叉口作为临时停车点，根据同一车牌号是否在特定时间差内重复出现在这些交叉口判断巡游车辆，筛选出五天共 85521 辆巡游车辆。假设每辆车的停车时间为 4 小时，计算周转率，从而估算出每天所需的临时停车位为 65 个。

针对问题四，分别做了五一黄金周假期管控与未管控的数据比较、五一与四月份的休息日数据比较。根据附件三路线计算出临时停车点处未加管控的相关数据，选择车流量、通行时间、巡游车辆数为评价指标，运用层次分析法综合评估，使用两独立样本的 T 检验进行量化和显著性分析，都表明五一临时管控措施有效。

本文亮点在于建立了加权调整概率分配的车流量估计模型，能够结合历史经验和实际数据，提供对车流量的合理估算，同时弥补了单一数据来源可能存在的不足。该问题的研究有助于减轻交通阻塞，提高道路通行能力，保障出行安全。

关键词：K-means 聚类 小波分析 线性规划 信号配时优化 层次分析法

一、 问题重述

1.1 问题背景

在城市化加速和汽车普及的背景下，交通拥堵问题变得愈加严峻。尤其是在假期和旅游高峰期，游客流量的激增加剧了这一困境。在一小镇热门景区周边，游客车辆的涌入导致交通状况复杂化。这些车辆因寻觅停车位而在道路上反复绕行，进一步加重了道路拥堵，影响了通行效率及旅行体验。

1.2 已知信息

- **道路布局：**纬中路长约 3.5 公里，连接环西路到环东路；经中路长约 1.8 公里，连接环北路到环南路。两路上共有 12 个交叉口，有路段行驶方向编号及交叉口之间的距离。（附件 1）
- **监控数据：**从 2024 年 4 月 1 日到 5 月 6 日，纬中路各交叉口车辆信息，包括车辆的拍摄地点、行驶方向、拍摄时间和车牌号，但不包括车辆的具体行驶方向。（附件 2）
- **特定措施：**五一黄金周期间交通管控措施。（附件 3）

1.3 待解决问题

本文结合实际，建立数学模型解决以下问题：

问题 1：对于经中路-纬中路交叉口，进行车流量差异分析，将一天分成几个时段，估算各个时段不同相位的车流量。

问题 2：基于上述条件，优化经中路和纬中路上所有交叉口的信号灯配置，最大化车流平均速度。

问题 3：根据五一假期的数据，估算景区需要多少临时停车位。

问题 4：结合相关数据，评价五一假期期间的临时交通管控措施效果。

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

问题一可分为两小问，一是划分时段，二是估计流量。首先进行数据预处理和特征提取，筛选出特定交叉口数据。针对第一小问，将数据按 24 个时段分类，得到每小时的车流量数据，画出趋势图可视化一天的车流量差异，再基于车流量波动情况，采用聚类算法合理分段。针对第二小问，在每个分好的时间段内，分别统计四个方向上通过每个路口的车流量，基于实际经验提出三种通行状态的基础概率，对分组统计得到的数据加权计算调整车流量分配比例，并将结果归一化处理，以此估计直行、左转和右转的车流量。

2.2 问题二的分析

问题二旨在优化两条主道上所有交叉口的信号灯配置，以最大化车辆的平均速度。为实现该目标，需要尽可能减少车辆因红灯造成的延误时间，即合理分配绿灯时间。依据问题一中提出的车流量比例分配模型，可以确定每个交叉口的车流量与绿灯时间成正比，故可以构建一个函数来计算各交叉口的绿灯时间，并通过可视化方式展示配时结果。将最大化车辆平均速度的目标转化为最小化总延误时间的问题，通过建立线性规划模型进行优化求解，与初始方案的结果进行比较分析。

2.3 问题三的分析

问题三需要针对五一黄金周期间的数据进行分析，识别巡游车辆并估算所需的临时停车

位数量。将假期的数据筛选出来，按照车牌号、时间戳、交叉口进行分组整理，检测到在一段时间内频繁出现于同一交叉口的车辆，判断其为巡游车辆。选择景区附近的四个交叉口作为临时停车位点，并分析这些交叉口的数据，以确认其是否为巡游车辆的集中区域。假设每辆巡游车辆的停车时间为 4 小时，基于这一假设计算周转率，从而估算所需的临时停车位数量。

2.4 问题四的分析

题目要求结合数据对临时管控措施的效果进行评价。为此，先在问题三的基础上根据附件三信息，重新筛选数据，计算巡游车辆和停车位需求量，将管控的五一黄金周与问题三未管控的五一黄金周进行对比分析。

为了进一步评价管控效果，又将管控的五一黄金周与四月份休息日进行比较。首先需要从附件 2 中筛选出五一黄金周期间的数据，并与四月份的休息日数据进行对比分析。选择四月份的休息日数据作为对比基准，是因为在非管控情况下，休息日的车流模式与五一假期较为相似，能够作为一个有效的对照样本。

接着，通过车流量和通行时间等关键指标，对管控措施进行初步评估。为了使各个指标更具综合性，使用层次分析法 AHP 来确定车流量、通行时间等指标的权重。通过 AHP，能够根据不同指标对交通状况的影响程度为其分配合理的权重，将它们融合为一个综合的指数，用以量化各路段的拥堵程度，显示管控措施的效果。

最后，使用两独立模型 T 检验对五一黄金周和四月份休息日的数据样本进行统计分析，验证两个时间段的均值是否存在显著性差异。

三、 模型假设

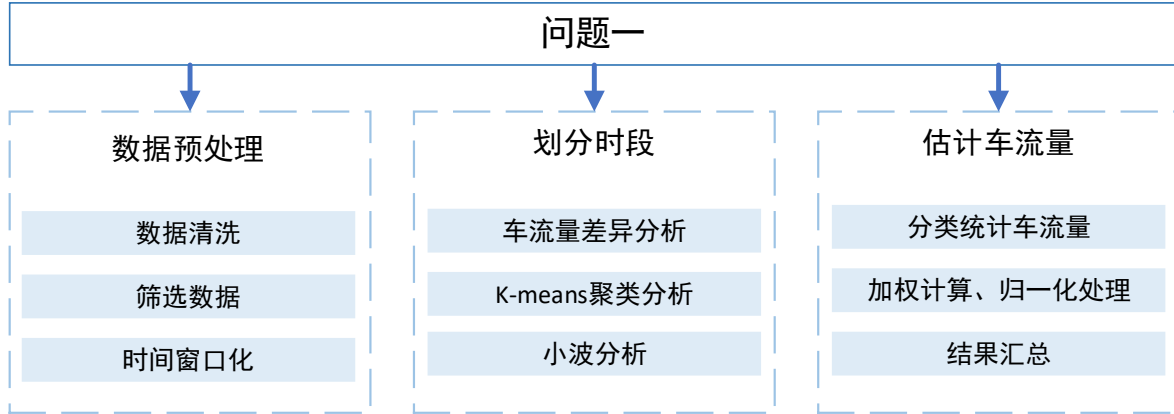
- 1. 假设每个交叉口驶入与驶出的车流量守恒；
- 2. 假设车流量在信号灯周期内保持稳定；
- 3. 不考虑不同车型的差异；
- 4. 假设监测期间无重大事件（如施工、交通事故等）影响交通流量。

四、 符号说明

符号	说明	单位
Q	每小时的车流量	辆/小时
Q_{ij}	第 i 个交叉路口第 j 方向的车流量	辆/小时
Q_i	第 i 个交叉路口的车流量	辆/小时
P	总停车位需求量	个
p	平均每天停车位需求量	个
T	信号灯总周期	秒
g_{ij}	第 i 个交叉路口 j 方向上的绿灯时间	秒

五、模型的建立与求解

5.1 问题一模型的建立与求解



5.1.1 数据预处理

在对经中路-纬中路交叉口的车流量进行分析之前，需要对原始数据进行预处理和整理，以确保数据的准确性和完整性。

(1) 数据清洗

首先检查是否存在缺失值，发现数据记录中存在车辆信息缺失（无车牌号），但数据占比较低，且对车流量的统计无影响，所以在本节中将此类数据保留。同时检测发现有少许数据存在方向特征丢失，推测可能是由数据采集设备故障或录入错误引起的，为避免对数据分析结果产生影响，选择将其删去。

接着检查是否存在异常值，在本题中应着重检测数据集中是否出现所有特征信息（地点、方向、时间、车牌号）完全重复的数据，因为这种重复值不符合交通行为逻辑，在这种情况下可以将其视为异常值删除。经检测，该数据集中不存在异常值。

(2) 数据筛选和排序

根据题目要求，对于拍摄地点提取经中路-纬中路交叉口的所有数据，共筛选得出六百多万条数据。在 MATLAB 中将数据时间戳转换为 `datetime` 格式并按时间顺序排列，以便下一步操作。

(3) 时间窗口化

时间窗口化是将连续的时间数据划分成离散的时间窗口进行汇总或分析的过程，可以简化数据处理、识别时间段内的模式和趋势。

应当注意的是，单条车辆信息是计算车流量的重要组成部分，但它本身不是车流量。为了后续分析车流量变化趋势和划分时段，本文定义车流量 Q ，单位为“辆/小时”，以小时为时间窗口进行划分。对原始数据中的时间戳进行简化，转换为特定的时间段标识数字，例如，将“2024-04-03T14:39:08.632”转换为“14”以匹配按小时分段。全部转换完成得到 24 个单位时间段的车流量数据。

5.1.2 车流量时段差异可视化

基于上述准备，将筛选出的所有数据进行可视化分析，绘制得出的车流量趋势图如图 1 所示。

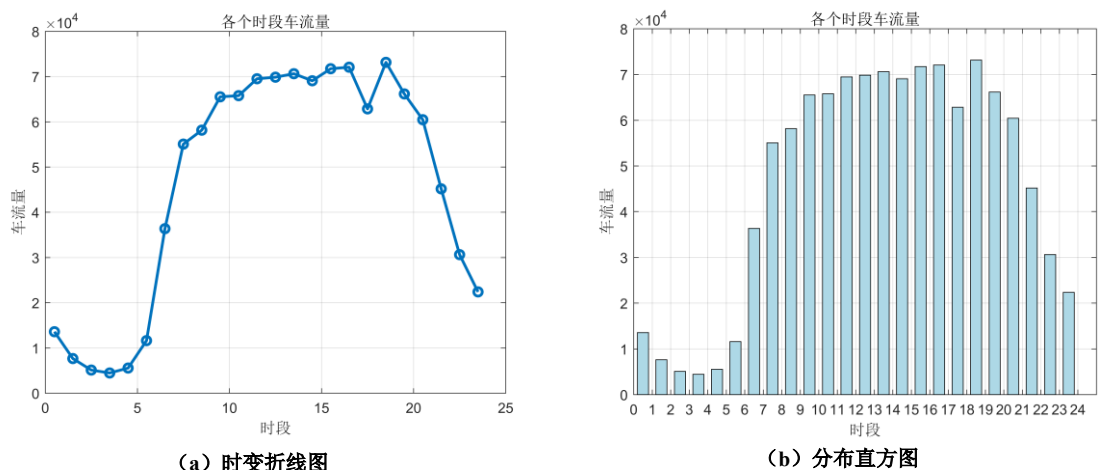


图 1 车流量时变趋势图

显然，在一天中根据车流量的波动情况大致可分为三个阶段，分别为：白天的高峰、晚上的平峰和凌晨的低谷。图上趋势表明：车流量从早晨六点开始急剧增加，在上午十点左右达到高峰并基本持续，直到晚上八点左右开始断崖式下降，在凌晨时刻到达最低点。

这样的数据变化趋势也与实际情况吻合，由于经中路-纬中路交叉口位于风景区附近，不仅会有本地居民的通勤，外地旅客的来往也是白天和前夜时段车流量高居不下的重要因素。

考虑到交通流量的方向性差异，将数据按四个方向编号分类，再分别对各个方向上的日流量变化趋势用折线图直观展示，绘制结果如下图所示：

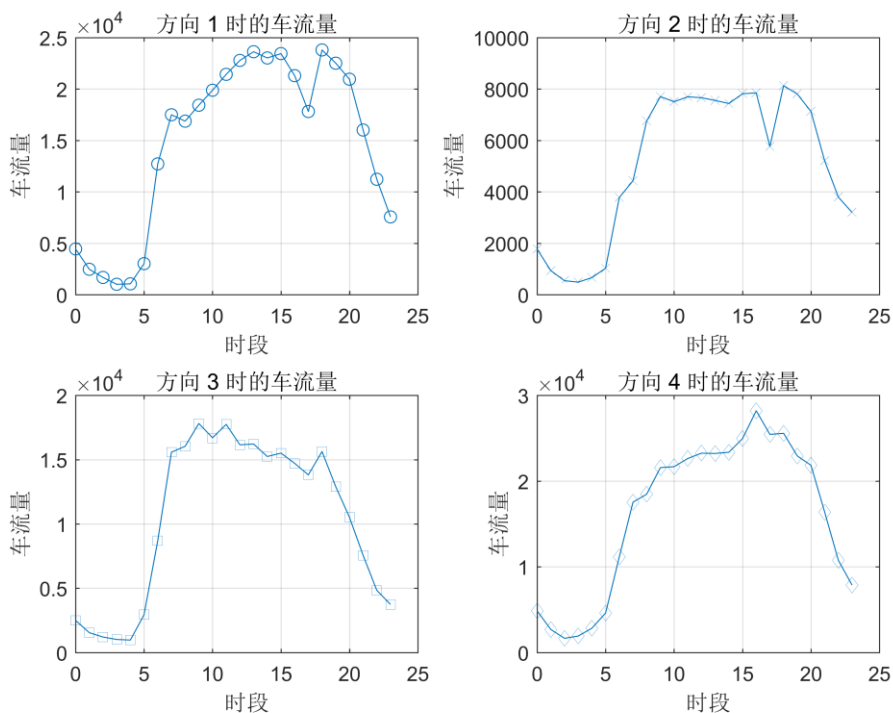


图 2 四个方向上车流量时变趋势图

由图 2 可知，经中路-纬中路交叉口四个方向的车流量大体走势相同，同样能分成三个时间段，主要波动差异体现在 6:00-20:00 的高峰时段内：方向 1（东→西）和方向 4（北→南）都是驶离景区，对比其余两图，图形差异体现在傍晚时段车流量迅速升高且位于该方向上日流量的最高值。同样的，方向 2（西→东）为驶往景区方向，在白天车流量呈稳定高峰。方向 3（南→北）则与其他方向车流量的变化趋势完全相反，表现为逐渐下降，刚好对应了该时段

内交通流量转移分散到其余方向的情况。

以上分析是基于生活经验的人为主观判断，为保证建模的严谨性，通过查阅交通流管理的相关资料，本文考虑采用经典的 K-means 聚类算法^[1]对时段进行划分。

5.1.3 基于 K-means 聚类算法的时段划分

K-means 聚类是一种无监督学习方法，能够自动从数据中发现和提取时段划分，无需预先定义时段。它使用迭代的方法来最小化簇内平方误差，算法的实施和计算相对简单而快速，适合处理交通流量这样的大规模数据。

(1) 确定最佳聚类数

在进行聚类分析前先要确定聚类个数 k ，本文采取常用确定方法：肘部法则和平均轮廓法。

肘部法则以样本点到聚类中心的距离 SSE（误差平方和）作为评价 k 值的标准：

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (1)$$

其中， C_i 表示第 i 个簇， p 为 C_i 簇中的样本点， m_i 是簇的质心。

随着聚类数 k 的增加，样本划分的精细程度会逐渐提高，每个簇的聚合程度也会随之增加，那么误差平方和（ SSE ）自然会减少。当 k 达到数据的最佳聚类数时，进一步增加 k 所得的聚合程度会迅速减小，故 SSE 的下降幅度显著减缓。最终，随着 k 值的持续增大， SSE 的变化趋于平稳。综上所述， SSE 与 k 的关系图呈现出“手肘”形状，而肘部所对应的 k 值即为数据的最佳聚类数。

平均轮廓法以轮廓系数 $S(i)$ 反映聚类效果，其值的范围是 $[-1, 1]$ 。轮廓系数接近 1 意味着样本 i 更好地归类于当前簇（聚类效果好），接近 0 意味着样本 i 位于簇边界（聚类效果不佳），接近-1 意味着样本 i 可能被错误地划分到当前簇，应考虑重新分配。轮廓系数公式为：

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (2)$$

其中， $a(i)$ 为样本与其所属聚类中其他样本的平均距离，表示凝聚度； $b(i)$ 为样本与最近的其他聚类中所有样本的平均距离，表示分离度。

两种算法结果如图 3 所示：

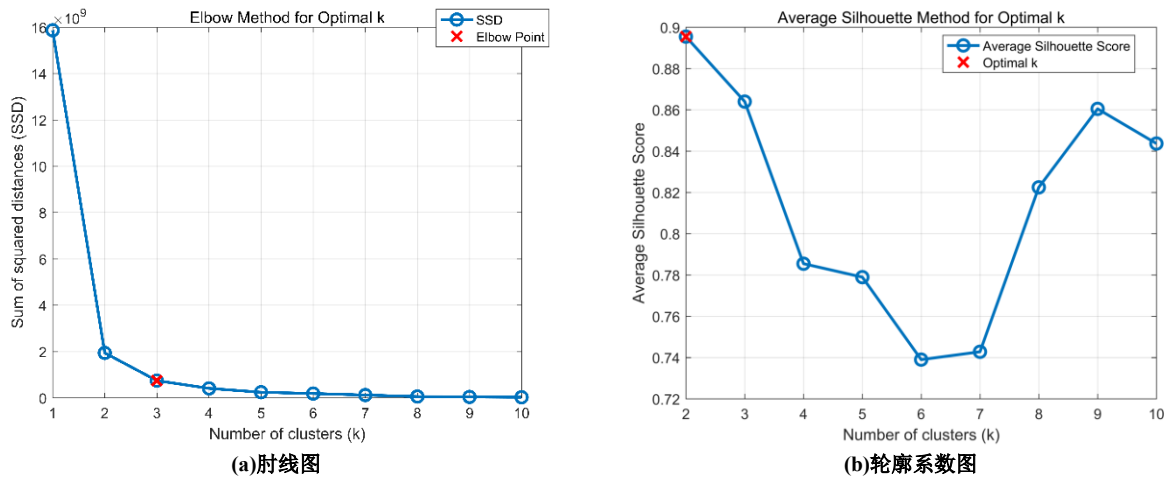


图 3 确定最佳聚类数

图 3-(a)表明，随着聚类数 k 的增加， SSE 逐渐减少，在 $k = 3$ 后斜率变化趋于平缓；图 3-(b)表明当 $k = 2$ 时 $S(i)$ 最接近 1，聚类效果最好，当 $k = 3$ 时效果次之。为更好地捕捉车流量的波动差异，细化的分段方法更优，故确定最佳聚类数目为 3。

(2) 算法流程

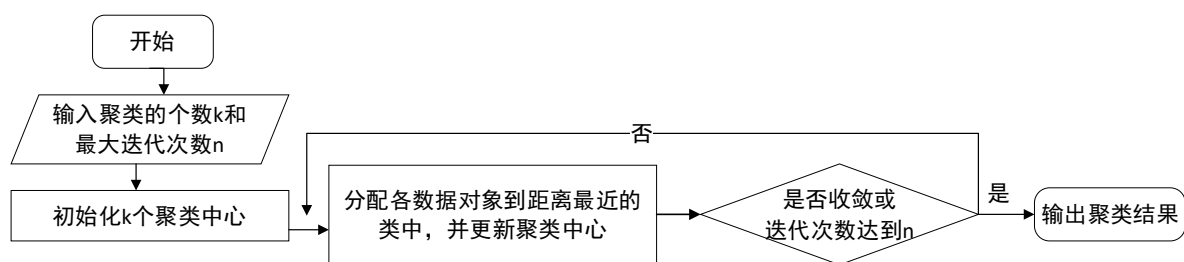


图 4 K-means 聚类算法流程图

(3) 分段结果

用 MATLAB 编程实现该算法, 聚类结果见表 1。

表 1 时间分段结果

类别	高峰期	平峰期	低谷期
时间段	7:00-20:00	6:00、21:00-23:00	0:00-5:00

可视化效果如图 5 所示, 其中蓝色代表高峰时段, 黄色为平峰时段, 绿色为低谷时段:

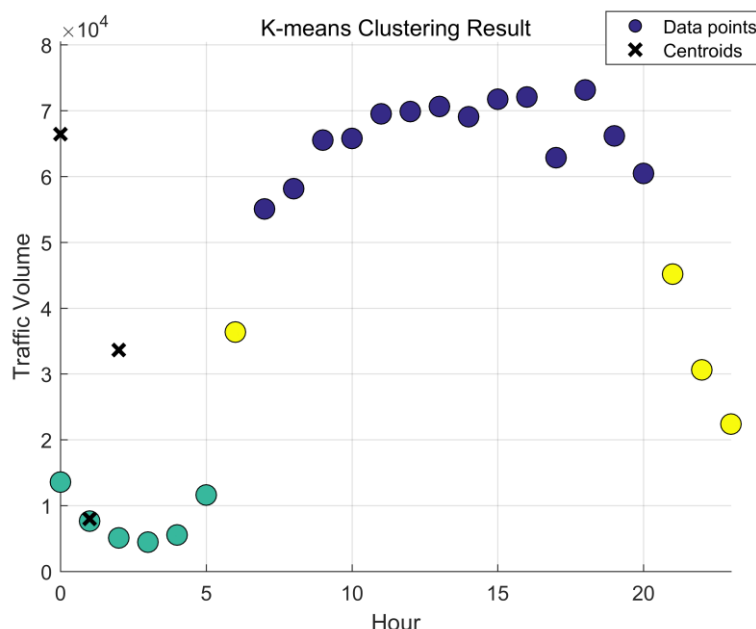


图 5 K-means 聚类效果图

高峰期涵盖了从早晨 7:00 到晚上 20:00 的时间段, 此时段的车流量显著高于其他时间段。在白天, 游客车辆涌入景区, 导致景区周边道路车流量增加。早高峰 (7:00-9:00) 和晚高峰 (17:00-20:00) 尤其明显, 游客和本地居民的出行高峰叠加, 导致道路繁忙。

平峰期包括早晨 6:00 和晚间 21:00 至 23:00, 清晨虽然接近早高峰期的开始, 但车流量相对稳定, 未达到高峰期的繁忙程度。晚间车流量逐渐回落, 尽管景区可能仍有一些晚间活动, 但车流量已低于白天的高峰期。该时段车流量虽然相对较高, 但显著低于高峰期。

低谷期覆盖了午夜 0:00 到清晨 5:00 的时间段, 大部分居民和游客在夜间处于休息状态, 景区的活动也基本暂停, 此时段车流量处于最低水平。

基于对聚类结果的分析, 认为该时段划分方法符合实际, 较为合理。

5.1.4 基于小波分析的时段划分

小波分析是一种在时间和频率上进行信号分析的数学方法, 能够有效地处理非平稳信号。常用的小波变换包括连续小波变换 (CWT) 和离散小波变换 (DWT)。在时间分段问题中,

DWT 常被用来提取信号中的重要特征。

Step.1 选择小波基：对于波动明显的时序数据选择具有良好时间分辨率的短支持小波 Daubechies 小波。

Step.2 进行离散小波变换：对时间序列 $x(t)$ 进行离散小波变换，得到不同尺度上的细节系数和近似系数。公式如下：

$$x(t) = \sum_{j,k} c_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3)$$

其中， $c_{j,k}$ 是小波变换系数， $\psi_{j,k}(t)$ 是尺度 j 和位移 k 处的小波基函数。

Step.3 分析小波系数：通过分析各级别的细节系数，确定时间序列中的突变点或局部变化。高频系数（细节系数）通常对应于数据中的突变或快速变化，可以用于识别不同时段特征。

Step.4 确定分段：车流量时段分类图如下所示：

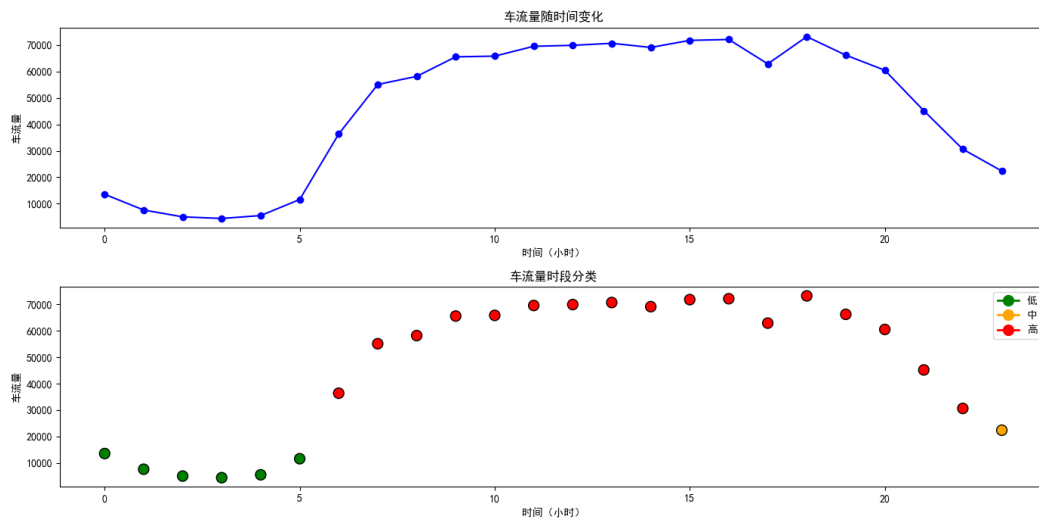


图 6 小波分析结果图

第一幅图显示了车流量随着一天 24 小时的时间变化的曲线。从图中可以看出，车流量在早晨和傍晚时段分别有两个明显的峰值，表现出典型的交通高峰特征。

第二幅图使用不同的颜色对车流量进行了分类，标识出低、中、高车流量的时段。绿色表示低车流量时段：主要集中在午夜到清晨（0:00-6:00）和深夜（22:00 之后），这段时间交通流量稀少，是夜间交通需求相对较低的正常表现。红色表示高车流量时段：覆盖了早高峰（6:00-10:00）和晚高峰（16:00-19:00）两个时段，车流量大幅度上升，与大多数通勤高峰相一致。10:00-16:00 虽然车流量较高，但波动较小。黄色表示中等车流量时段：出现在深夜接近 23:00 时，车流量介于高峰和低谷之间。

根据小波分析的时段分类，中等车流量时段极少，不利于后续建模，故以 K-means 算法所分时段作为基准。

5.1.5 基于经验概率的加权车流量估计

本文假设车流量守恒，即每个交叉口驶入与驶出的车流量基本不变。

对于题目所说的 4 个相位，需要注意的是，一个相位为一对相反的方向，示意图如下所示：

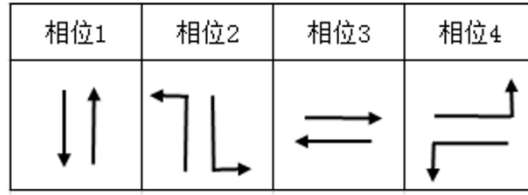


图 7 相位示意图

本文所建立的车流量估算模型是以一个方向为单位进行分析，因此所得结果是在每个方向上的车流量估计值。

图 8 是以经中路-纬中路交叉口为例，绘制的交叉口示意图。

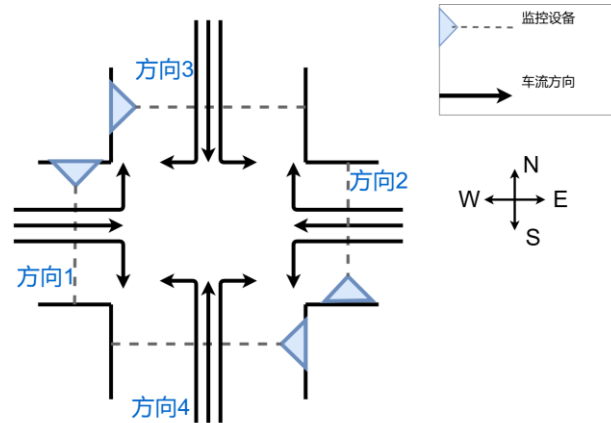


图 8 经中路-纬中路交叉口示意图

聚焦于单个交叉口，每个交叉口都有西→东、东→西、北→南和南→北四个方向，在监控设备仅能记录过车记录，无法记录车辆的通行状态是直行、左转还是右转的局限情况下，若进行统计分析来确定不同时段各相位的车流量，无疑会加大复杂性；实际情况中车辆可能因为进出停车场或其他原因出现突然消失或产生的现象，额外的推测也可能导致较大误差。

于是结合历史统计概率和实际统计数据，引入基于经验概率的加权估计法：

(1) 确定基本概率

在该方法中，基本概率的确定依赖于历史研究，参考实测结果^[2]，将交叉口的车流量按照直行基本概率 $P_s = 60\%$ 、右转基本概率 $P_r = 25\%$ 、左转基本概率 $P_l = 15\%$ 的比例进行分配。

(2) 统计各方向数据

根据分段结果，在每个时间段内分组统计四个方向的车流量，结果如下表所示：

表 2 各时段 4 个方向车流量

	0:00-5:00	6:00、21:00-23:00	7:00-20:00
方向 1	13674	293409	47524
方向 2	5428	101263	15980
方向 3	10201	214579	24846
方向 4	18670	320687	46178

(3) 加权调整比例

以 0:00-5:00 时间段自西向东（方向 2）为例，在该点上直行状态所对应方向为自身所在方向，右转状态为自北向南（方向 4），左转状态为自南向北（方向 3）。根据题目所提供的实际数据计算实际比例，显然基本概率与实际比例存在差距，所以对这三个方向的车流量数据计算影响权重调整概率分配，建立公式如下：

$$\omega = \frac{F_{ij}}{F_i} \times m \quad (4)$$

其中, ω 为影响权重, m 为基本概率, F_i 为第 i 时段三种通行状态的总车流量, F_{ij} 为第 i 时段中方向 j 的车流量 ($i=1,2,3$; $j=1,2,3,4$)。

同理, 算得结果见表 3:

表 3 影响权重计算结果

		0:00-5:00	6:00、21: 00-23: 00	7:00-20:00
南	直行	0.208873	0.211321	0.168733
	左转	0.069996	0.072238	0.080686
	右转	0.046309	0.041552	0.045218
北	直行	0.296569	0.268973	0.252610
	左转	0.090504	0.102539	0.108322
	右转	0.027786	0.024931	0.027131
东	直行	0.192841	0.212442	0.240530
	左转	0.059942	0.064736	0.052396
	右转	0.065824	0.058048	0.058429
西	直行	0.094953	0.095452	0.110202
	左转	0.136083	0.125951	0.132689
	右转	0.044612	0.050566	0.042836

(4) 数据归一化

使用归一化处理数据都会被缩放到 $[0, 1]$, 符合 $P_s + P_r + P_l = 1$, 能够直观了解任一时间段任一方向上的三种通行模式的车流量分配占比情况。

数据归一化的公式为:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (5)$$

其中, X_{max} 和 X_{min} 分别为影响权重的最大值和最小值。

将权重数据导入 SPSSPRO, 处理结果如表 4 所示:

表 4 归一化处理结果

		0:00-5:00	6:00、21: 00-23: 00	7:00-20:00
南	直行	0.642333162	0.649994825	0.572682012
	左转	0.215254967	0.222195941	0.273848305
	右转	0.142411872	0.127809233	0.153469683
北	直行	0.714868455	0.678464966	0.650951300
	左转	0.218155491	0.258647486	0.279135534
	右转	0.066976054	0.062887548	0.069913166
东	直行	0.605260731	0.633728255	0.684576713
	左转	0.188138825	0.173161366	0.149126345
	右转	0.206600443	0.193110379	0.166296942
西	直行	0.493682869	0.463108926	0.464391739
	左转	0.161844422	0.185926059	0.149919145
	右转	0.344472709	0.350965015	0.385689116

(5) 车流量估算

定义车流量估计值 Q_{est} , 计算公式为:

$$Q_{est} = \frac{X_{norm} \cdot Q}{d \times T} \quad (6)$$

其中, d 为采集车流数据的天数, 这里 $d = 36$; T 为时间段中的小时个数。

估算结果见下表：

表 5 不同时段各个方向车流量估算结果

	0:00-5:00	6:00、21: 00-23: 00	7:00-20:00
南→北	66.62422296	1447.533962	52.47085311
南→西	14.77127578	284.6302752	14.06135516
南→东	14.77127578	494.8288185	25.09080761
北→南	40.51318392	1011.002319	32.09034922
北→西	12.36335647	385.4188810	13.76071719
北→东	3.795681833	93.71074482	3.446552630
西→东	45.97964021	1291.260928	64.55123753
西→北	14.29227944	352.8271060	14.06166750
西→南	15.69474701	393.4744656	15.68074576
东→西	14.88728118	325.6652717	14.72416665
东→北	10.38776590	246.8039608	12.22879378
东→南	4.880508473	130.7460452	4.753388773

5.2 问题二模型的建立与求解

在问题一中，通过统计直行、左转或右转三种状态在某一方向上占比的不同来调整车流量的概率分配。由于信号灯的绿灯时间与车流量比例成正比，将类似方法推广到任意交叉口的信号灯配置问题，构建一个车流量比例分配函数，即可知道任意交叉口的信号灯时间分配，能够提供初步的优化方案。

5.2.1 模型假设与数据准备

假设在信号灯周期内车流量相对稳定，虽然每个时刻的车流量可能有所波动，但总体上保持在一个相对恒定的水平，这在配置信号灯时可以简化模型的复杂性。

对后续模型需要用到的数据进行准备：

(1) 车流量数据

用与问题一相同的数据处理流程分别筛选出每个交叉路口四个方向的车流量 Q_{ij} 数据，分别计算出每个交叉口的总车流量 Q_i ：

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (7)$$

其中 n 为每个交叉路口的方向个数。

(2) 信号周期数据

题目中没有给出关于信号灯的相关时间，本文假设每个交叉口信号灯总周期 T 为固定的120秒。

5.2.2 基于车流量比例分配函数的信号灯优化配置

根据信号灯绿灯时间与车流量的关系，每个方向的流量比例 P_{ij} 为：

$$P_{ij} = \frac{Q_{ij}}{Q_i} \quad (8)$$

各交叉路口的每个方向的绿灯时间 T_{gij} 可以根据流量比例 P_{ij} 来进行分配：

$$T_{gij} = P_{ij} \times T \quad (9)$$

详细计算结果见文后附录表格，下表为选取的部分结果：

表 6 绿灯时间配置初步优化结果（部分）

交叉口	方向	总车流量	流量占比	绿灯配时
环西路-纬中路	1	670620	0.318024268	38
环西路-纬中路	2	587569	0.278639470	33
环西路-纬中路	3	406530	0.192786385	23
环西路-纬中路	4	443988	0.210549877	25
.....				
环南路-经中路	1	148188	0.191225867	23
环南路-经中路	2	104156	0.134405765	16
环南路-经中路	3	237125	0.305992616	37
环南路-经中路	4	285468	0.368375752	44

由于数据较多无法在正文中展示，绘制极坐标雷达图如图 9 所示，将每个交叉口四个方向的绿灯时长可视化，以便分析差异情况。

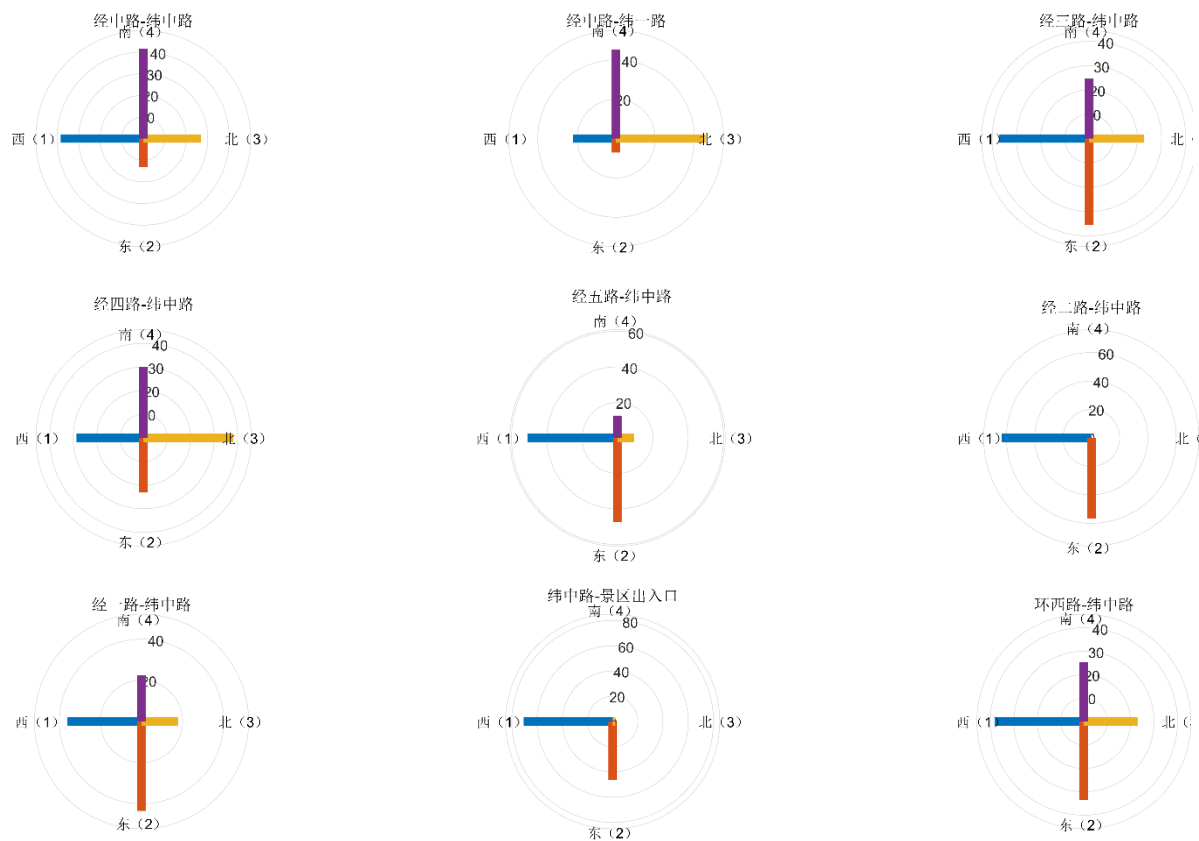


图 9 绿灯时间配置初步优化结果雷达图

单位环状图中某些方向的柱状图较长，说明这些方向的车流量较大，绿灯时间也相应分配得较多。在不同交叉口的绿灯时间分配中，主干道的方向通常获得更多的绿灯时间，这是因为这些方向的车流量更大，交通需求更高。经中路-纬中路作为主干道交汇点，这两个方向的车流量都比较大，因此南北方向和东西方向的绿灯时间分配较为均匀。

对于景区附近的主要道路，比如纬中路-景区出入口作为直接进入景区的交叉口，其东西方向（纬中路）的车流量尤其大，因为许多游客车辆沿着这一方向进出景区。为确保景区出入口的通行顺畅，东西方向的绿灯时间较长。东西方向的绿灯时间大于南北方向过多，虽反映了该路段的通行需求，尤其在旅游高峰期，东西方向的车流集中，但是其绿灯配时达到最大值接近 71s，而南北方向的配时仅有不到 1s，显然不符合常识，需要进一步优化配时结

果。

在完整数据中可以查看到经二路-纬中路交叉口 3、4 方向数据缺失，图中也有所体现。

这种简单有效的基础方法忽略了交叉口之间的距离，可能会导致交通信号灯的配置不协调。相邻交叉口之间的信号灯时间不匹配，也可能导致车辆在两个交叉口之间等待，增加总延误时间。

5.2.3 基于线性规划模型的信号灯优化配置

为了进一步优化交通信号灯的配置，引入线性规划（Linear Programming, LP）模型^[3]。其核心思想是通过优化目标函数，在一系列线性约束条件下（如信号灯周期、车流量与绿灯时间的比例等）调整决策变量的取值，并通过数学方法找到最优方案，从而实现合理的信号灯时间分配，提升通行效率。

以下是模型建立和求解过程：

Step1) 确定决策变量：

每个交叉路口每个方向的绿灯时间 g_{ij} 。

Step2) 确定目标函数

本题目标为车流量平均速度最大化，将其转化为延误时间最小化^[4]。这是因为，延误时间直接由信号灯时间的分配决定。例如，当绿灯时间增加，红灯时间减少时，车辆的延误时间会减少，这种变化可以通过线性方程来描述。而速度与信号灯分配时间、车流量等因素之间的关系复杂，难以用简单的线性模型表示。

优化表达式为：

$$\text{Minimize } Z = \sum_i \sum_j (T - g_{ij}) \times Q_{ij} \times k \quad (10)$$

其中， Z 为总延误时间， k 为延误系数。

Step3) 确定约束条件

①. 对信号周期的约束： $\sum_j g_{ij} + Y + R \leq T, \forall i$

每个交叉口的绿灯时间加上黄灯时间 Y 和红灯时间 R 不超过信号灯周期 T ，在 120 秒的信号灯周期中，设置 $Y = 5$ 。

②. 对绿灯时间范围约束： $g_{min} \leq g_{ij} \leq g_{max}, \forall i, j$

通过设定绿灯时间的范围，可以防止信号灯配置的不合理性，如绿灯时间过短导致的拥堵，或绿灯时间过长导致的其他方向的通行不畅。

③. 交叉路口距离约束： $\frac{g_{ij}}{v_{ij}} \geq \frac{D_{i, i+1}}{Q_{ij}}, \forall i, j$

绿灯时间应保证车辆可以从第 i 个交叉口行驶到第 $i + 1$ 个交叉口， v_{ij} 是车辆在第 i 个交叉口第 j 个方向的平均速度， $D_{i, i+1}$ 是相邻两个交叉口的距离。

④. 车流量与绿灯时间的关系： $g_{ij} \propto Q_{ij}$

绿灯时间应与该方向的车流量成正比关系。

Step4) 建立模型

通过上述步骤，可建立线性规划模型：

$$\text{Minimize } Z = \sum_i \sum_j (T - g_{ij}) \times Q_{ij} \times k \quad (11)$$

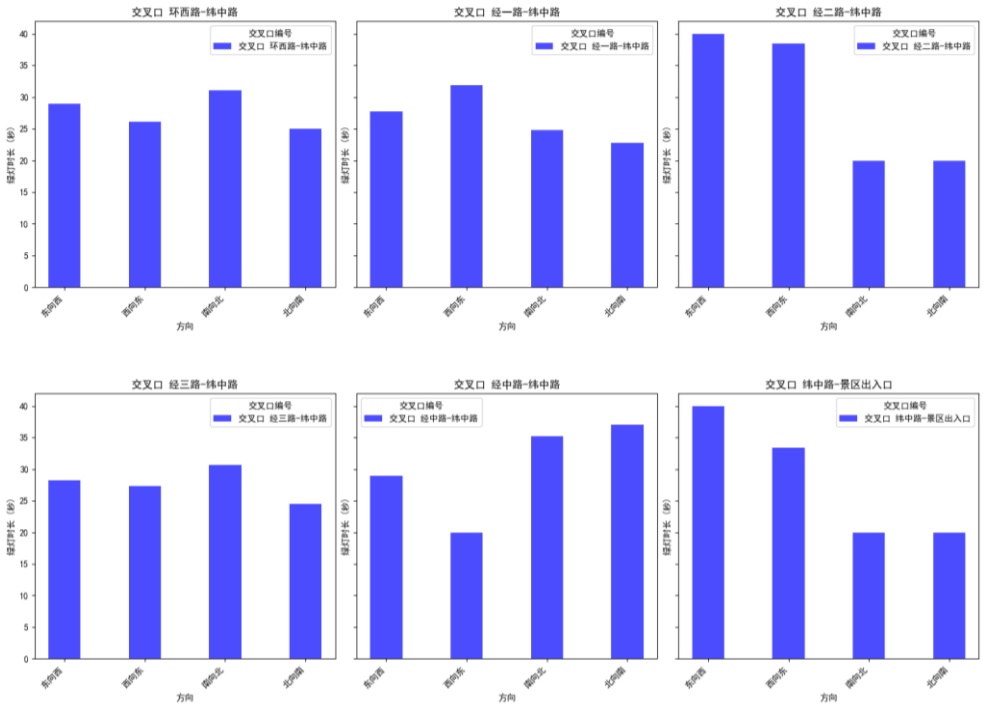
$$s.t. \begin{cases} \sum_j g_{ij} + Y + R \leq T, \forall i \\ g_{min} \leq g_{ij} \leq g_{max}, \forall i, j \\ \frac{g_{ij}}{v_{ij}} \geq \frac{D_{i, i+1}}{Q_{ij}}, \forall i, j \\ g_{ij} \propto Q_{ij} \end{cases}$$

用 python 代码运算求解得到结果如表 7 所示：

表 7 基于线性规划的最优交叉口绿灯时长配置

交叉口	方向 1	方向 2	方向 3	方向 4
环西路-纬中路	25	26	26	25
经一路-纬中路	25	31	25	25
经二路-纬中路	31	38	25	25
经三路-纬中路	25	27	26	25
经中路-纬中路	25	25	30	35
纬中路-景区出入口	33	33	25	25
经四路-纬中路	25	25	39	27
经五路-纬中路	27	33	25	25
环东路-纬中路	25	25	38	40
环北路-经中路	25	25	38	36
经中路-纬一路	25	25	45	37
环南路-经中路	25	25	38	36

绿灯时间的分配范围主要集中在 25 秒到 40 秒之间，符合通常信号灯配置标准。绘制了如图 10 所示直方图可视化配时差异：



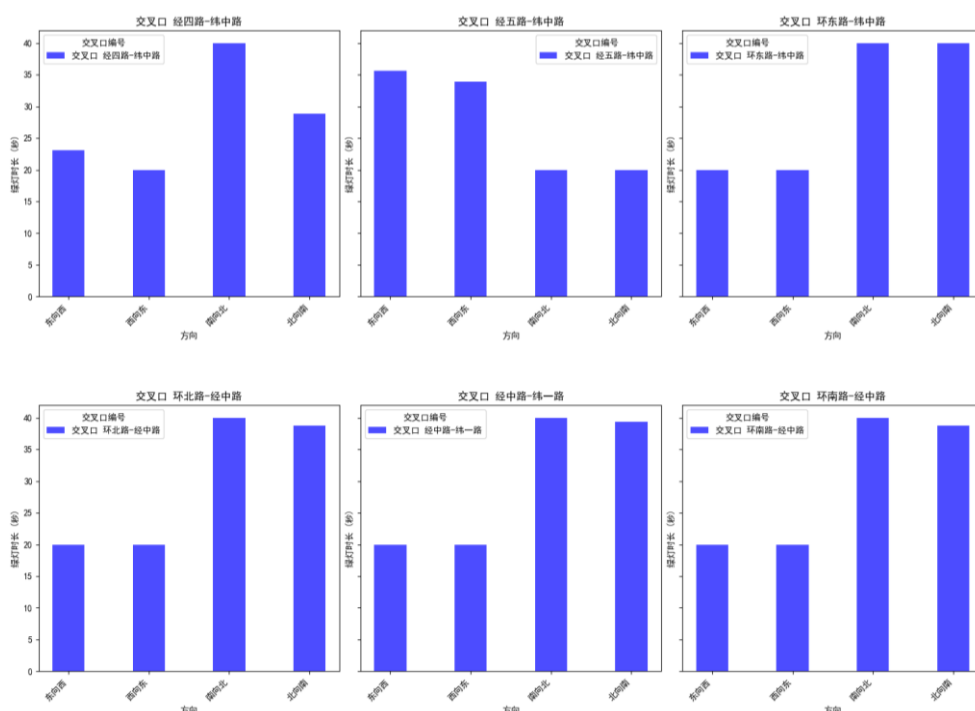


图 10 线性规划绿灯时长配置直方图

结合图表，选取三个具有代表性的交叉口进行分析：

以环西路-纬中路为外环路交叉口的代表。东西方向的绿灯时间与南北方向相近，表明各方向的车流量相对均衡。作为环路的一部分，该交叉口的车流量较为分散，其中东西方向略高，可能是因为车辆从外环进入主干道的需求较多。

其次，经中路-纬中路交叉口的南北方向绿灯时间明显高于东西方向。这是因为该交叉口是两条主干道的交汇处，南北方向的经中路承载着更大的交通流量，且该路段的交叉口间距较长，是主要的通行路线，车辆需要更多时间通过，因此南北方向的绿灯时间相对更长。

纬中路-景区出入口的东西方向绿灯时间显著高于南北方向。这是景区的主要入口，东西方向是车辆进出景区的主要通道，因此东西方向的绿灯时间被显著延长，以确保该方向的通行顺畅。类似的交叉口还有经二路-纬中路和经五路-纬中路，这些交叉口的东西方向都是通往或离开重要节点的主要路线。

将交叉口分类后，可以总结为：

主干道交叉口（如经中路-纬中路、环北路-经中路、环南路-经中路、纬中路-景区出入口）：这些交叉口的主要通行方向通常获得较长的绿灯时间，以确保主干道车辆顺畅通行，减少高流量方向的排队时间。

环路交叉口（如环西路-纬中路、环东路-纬中路、经一路-纬中路、经二路-纬中路）：这些交叉口的绿灯时间分配较为均衡，但当某个方向连接主要城区或外围区域时，绿灯时间明显增加，如环东路的南北方向和经二路的東西方向。

次要交叉口（如经三路-纬中路、经四路-纬中路、经五路-纬中路）：这些交叉口的车流量差异较大，主要通行方向通常获得更多的绿灯时间，以确保主要通行方向的车辆能够快速通过，如经五路的東西方向。

5.3 问题三模型的建立与求解

5.3.1 数据预处理

根据题目要求，本节基于五一黄金周期间的数据进行分析。因此，首先需从附件 2 中筛选出 5 月 1 日至 5 月 5 日的车辆信息数据。为了识别巡游车辆，需要设定明确的标准。巡游

车辆指的是由于景区附近临时停车位不足，司机在寻找停车位时，在周围道路上反复巡游的车辆。这类车辆的行为特征表现为在景区附近某一回路上短时间内的来回行驶。因此，应将靠近景区的几个交叉路口纳入识别标准，利用交叉口的监控设备识别车辆和捕捉行为特征。通过提取车牌号、时间、交叉口等特征信息，确定在景区附近交叉路口短时间内反复出现的车辆为巡游车辆。

5.3.2 确定判定条件

1. 时间条件

在同一个交叉路口，时间间隔四十分钟内，出现次数在两次以上的车辆疑为巡游车辆，即车辆在同一个交叉路口的时间差 $\Delta t \leq 2400$ 秒，则认为可能是巡游车辆。

2. 空间条件

选择以下四个交叉路口作为景区附近的临时停车位点^[5]进行筛选：

- 经中路-纬一路
- 经中路-纬中路
- 纬中路-景区出入口
- 经四路-纬中路

从这些交叉路口的车流数据中筛选出重复出现的车辆，以确定其是否为巡游车辆。仅当某辆车同时满足上述时间条件和空间条件时，才被判定为巡游车辆。

此外，在同一交叉口短时间内重复出现也有可能是车辆拐弯的情况，若时间差在五分钟内，即 $\Delta t \leq 300$ 秒，则确定为拐弯。

部分判断结果见表 8，完整结果表见支撑材料。

表 8 巡游车辆筛选结果（部分）

车牌号	交叉口	数量	起始时间	结束时间	时间段
3B56PBV	纬中路-景区出入口	2	2024/5/3 11:16	2024/5/3 11:49	2024-05-03 11:16:37 到 2024-05-03 11:49:51
3B56PBV	经中路-纬中路	2	2024/5/3 11:34	2024/5/3 11:41	2024-05-03 11:34:23 到 2024-05-03 11:41:40
3B56PBV	经中路-纬中路	2	2024/5/3 11:41	2024/5/3 12:02	2024-05-03 11:41:40 到 2024-05-03 12:02:00
3BBGB6F	经中路-纬一路	2	2024/5/4 17:50	2024/5/4 18:05	2024-05-04 17:50:21 到 2024-05-04 18:05:27
.....					
AC08CAE	纬中路-景区出入口	18	2024/5/2 21:34	2024/5/2 21:34	2024-05-02 21:34:24 到 2024-05-02 21:34:25
AC08CAE	纬中路-景区出入口	19	2024/5/2 21:34	2024/5/2 21:34	2024-05-02 21:34:15 到 2024-05-02 21:34:24
AC08CAE	纬中路-景区出入口	20	2024/5/2 21:34	2024/5/2 21:34	2024-05-02 21:34:13 到 2024-05-02 21:34:15
AC08CAE	纬中路-景区出入口	21	2024/5/2 21:34	2024/5/2 21:34	2024-05-02 21:34:13 到 2024-05-02 21:34:13

5.3.3 估算停车位需求量

题目缺少实际停车时间数据，于是假设每辆车的停车时间为 4 小时，在五一黄金周时间内，每天 24 小时，一共则为 120 小时。计算出停车位的周转率。

停车位周转率表示每个停车位在五一黄金周内可以被多少辆车使用，计算公式如下：

$$TR = \frac{H}{h} \quad (12)$$

其中，TR 为停车位周转率，H 为假期总时长 120 小时，h 为每辆车的停车时间 4 小时。

总停车位需求量：五一黄金周期间所需要的停车位需求量为巡游车量总数除以停车位周转率，公式为：

$$P = \frac{N}{TR} \quad (13)$$

其中，N 为巡游车辆总数。

总停车位需求量 P 除以 5 天，得到五一黄金周每天所需的平均停车位需求：

$$p = \frac{P}{5} \quad (14)$$

计算得：周转率 $TR = 30$ ，假期五天停车位总需求为 325 个，每天停车位需求为 65 个。

5.4 问题四模型的建立与求解

5.4.1 五一黄金周管控与未管控比较

题目要求对五一黄金周实行管控措施的效果进行评价，根据附件三路线安排，对交叉路口的行驶方向作出限制，筛选出经中路-纬一路、经中路-纬中路、纬中路-景区出入口和经四路-纬中路四个路口的数据，重新计算出巡游车辆和停车位需求。结果对比如表 9 所示：

表 9 五一管控前后对比

名称	管控前 巡游车 辆	管控后 巡游车 辆	管控前总 停车位需 求量	管控后总 停车位需 求量	管控前平 均每天停 车位需求 量	管控后平均 每天停车位 需求量
经中路-纬一路						
经中路-纬中路						
纬中路-景区出入口	9760	5091	325	170	65	34
经四路-纬中路						

由表 9 数据可分析出，在五一黄金周时期对景区道路进行管控后的巡游车辆由 9760 变为了 5091，减少了约 48.1% 的巡游车辆，并且总停车位需求量也从 325 减少为 170，平均每天停车位需求量从 65 减少为 34。由此可表明，实行管控措施后，减少了车辆在交叉路口的停留时间，提高了通行效率。

5.4.2 数据预处理

为了进一步评价五一黄金周临时管控措施的效果，又选取了非五一黄金周的数据进行比较，考虑到休息日景区车流量会优于工作日时间，能够有效比较临时管控措施的影响，所以从附件 2 中筛选出四月份五个休息日的数据，即 4.13、4.14、4.20、4.21、4.27 这五天作为对照组来与五一黄金周进行对比分析。

5.4.3 指标构建与结果可视化

1. 车流量：

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (15)$$

将五一黄金周与四月份五天休息日的车流量进行可视化对比，如下图所示：

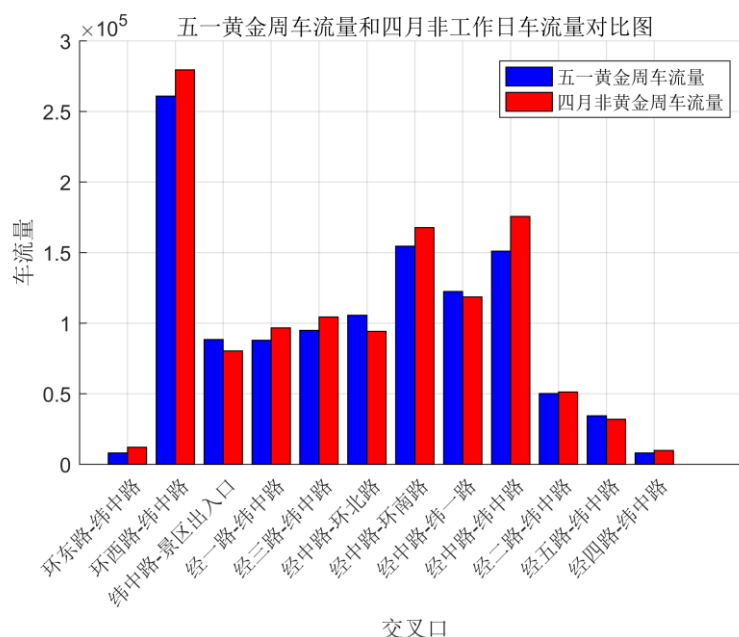


图 11 五一黄金周车流量和四月非工作日车流量对比图

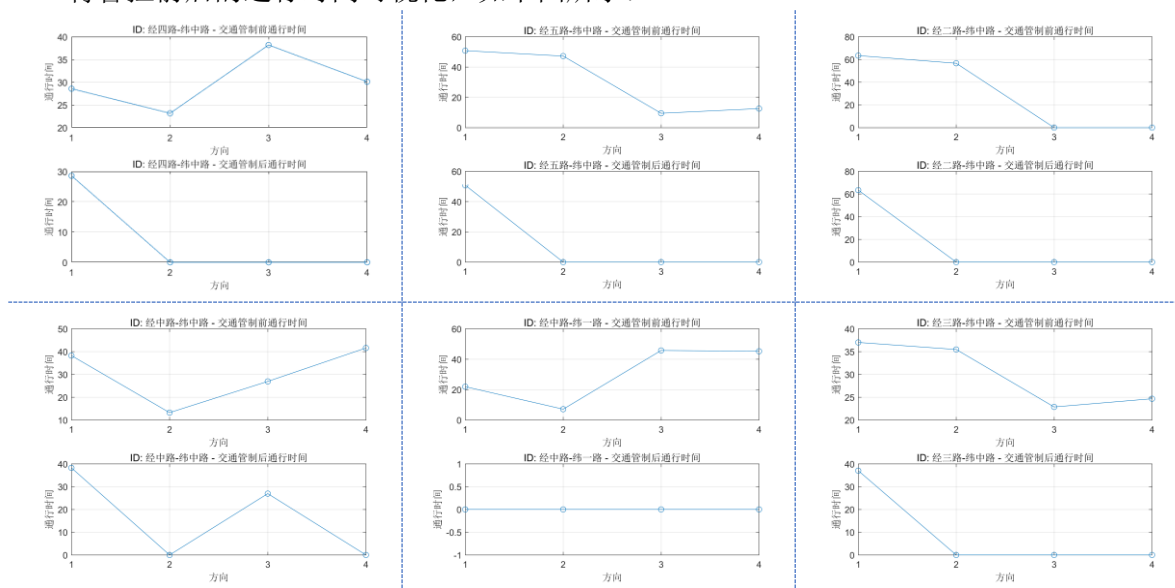
在大部分交叉口，五一黄金周的车流量（蓝色）普遍低于四月非黄金周的车流量（红色）。初步判断是由于五一期间的临时管控措施在一定程度上缓解了部分路段的交通压力。尤其是在靠近城市外围的交叉口，如环东路-纬中路和环西路-纬中路，车流量大幅下降，说明交通限制政策在这些区域有效减少了车辆的进出。

2.通行时间：车辆通过交叉口所用的平均时间，计算公式如下：

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{i,end} - t_{i,start})}{n} \quad (16)$$

$t_{i,start}$ 为车辆进入交叉口的开始时间， $t_{i,end}$ 为车辆进入交叉口的结束时间， n 为监控到的车辆数量。

将管控前后的通行时间可视化，如下图所示：



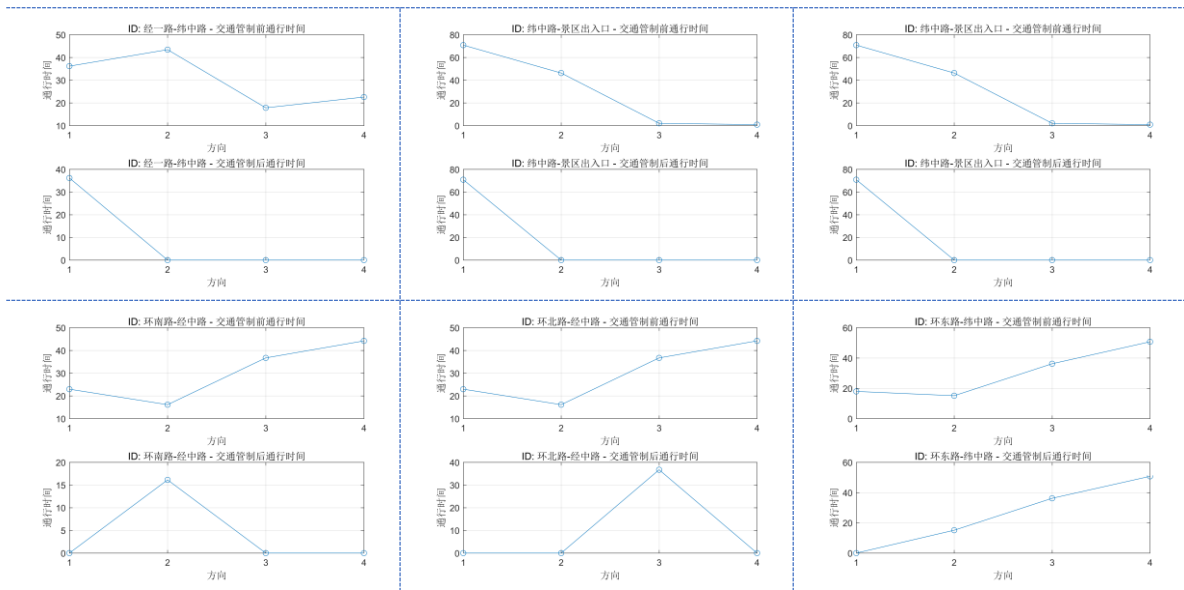


图 12 各交叉口管控前后的通行时间对比折线图

几乎所有交叉口的主要方向（如方向 1 和方向 3）的通行时间都大幅减少，显示临时交通管制措施有效地缓解了交通压力。特别是在假期期间，东西向（方向 1 和方向 2）的车流量较大，通过管控，东西向的通行效率明显提高。

次要方向（如方向 2 和方向 4）的通行时间在管控后普遍接近 0，显示这些方向的车流在管控期间被有效引导，或者受到限制，减少了车辆通行。

在重要路口（如景区出入口、主干道交叉口等），通行时间大幅减少，说明管控措施对于这些重点区域的交通压力起到了有效的疏导作用。特别是在景区附近，这些管控措施能够帮助减少游客车辆的滞留，从而提高了交通流动性。

多数交叉口的通行时间变化趋势一致，表现为主通行方向的显著缓解，次要方向几乎被限制或分流。这种一致性表明了交通管制策略在多个交叉口的有效性，是假期期间针对大流量方向实施的集中管控的结果。

5.4.4 AHP 评价模型

层次分析法（AHP）是一种结合定性与定量分析的决策方法^[6]，旨在将决策者对复杂系统的思维过程模型化并进行量化分析。该方法通过将复杂问题分解为多个层次和因素，并对各因素进行两两比较和权重计算，最终得出各方案的相对重要性。通过这种分析，AHP 为决策者提供了基于不同方案权重的定量依据，以辅助最佳方案的选择。基本步骤为：

1. 明确评价目标：评估交通管理措施的效果。

2. 建立层次结构：

目标层：交通管理措施的效果评价。

准则层：包括三个评价指标，车流量、通行时间和巡游车辆。

方案层：五一黄金周期间实施的不同交通管理措施。

3. 构造判断矩阵：

在准则层，对各元素进行两两比较，并根据相对重要性赋值（通常是 1-9 标度）。评估各个评价指标：车流量、通行时间、巡游车辆的相对重要性。构造判断矩阵 C：

$$C = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, a_{12} 表示车流量相对于通行时间的重要性, a_{13} 表示车流量相对于巡游车辆的重要性, a_{23} 表示通行时间相对于巡游车辆的重要性。

根据历史数据选择合适的值进行填充, 得到以下判断矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 计算权重和特征向量。

对准则层判断矩阵 C 进行归一化和计算特征向量, 得到准则层的权重向量。

$$W = \begin{pmatrix} \text{平均值}_1 \\ \text{平均值}_2 \\ \text{平均值}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{0.2857+0.3333+0.2730}{3} \\ \frac{0.1429+0.1667+0.1803}{3} \\ \frac{0.5714+0.5000+0.5466}{3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2974 \\ 0.1633 \\ 0.5393 \end{pmatrix}$$

将特征向量 W 归一化, 使得权重的和为 1。

表 10 各指标权重

车流量	通行时间	巡游车辆
0.533	0.282	0.185

5. 加权综合得分公式:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot r_{ij} \quad (18)$$

其中:

- S_i 表示第 i 个方案的加权综合得分;
- ω_j 表示第 j 个指标的权重;
- r_{ij} 表示第 i 个方案在第 j 个指标下的得分;
- n 是指标的总数;
- $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ (权重之和为 1)。

表 11 指标数据

	车流量 (千辆/时)	通行时间	巡游车辆
4 月	9.3960	30	28
5 月	11.2378	36	34

根据综合得分公式计算得出:

四月休息日的加权综合得分为 18.65;

五一假期的加权综合得分为 22.43;

这表明 5 月的交通管理综合表现得分高于 4 月。

6. 一致性检验:

计算一致性指标 CI 和随机一致性比率 CR 。

CI 计算公式为

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (19)$$

其中， λ_{max} 使判断矩阵的最大特征值， n 是判断矩阵的阶数。 $CR = \frac{CI}{RI}$ ， RI 为随机一致性指数。

式(17)中，当 $CI = 0$ 时，判断矩阵具有完全一致性；反之， CI 愈大，则判断矩阵的一致性就愈差。

计算得 $CI = 0.075 < 0.1$ ，判断矩阵的一致性较好。

5.4.5 两独立样本 T 检验

为了验证五一黄金周和四月份休息日的交通数据是否有显著性差异，使用 T 检验分析两个时间段的平均拥堵指数。假设两个样本均值为 μ_W 和 μ_A ，其检验统计量为：

$$t = \frac{\mu_W - \mu_A}{\sqrt{\frac{s_W^2}{n_W} + \frac{s_A^2}{n_A}}} \quad (20)$$

其中， s_W 和 s_A 分别为五一和四月样本的标准差， n_W 和 n_A 分别为五一和四月份的样本数量。根据计算出的 t 值与临界值比较，确定是否存在显著性差异：

如果 $|t|$ 超过临界值，则表明五一黄金周和四月份休息日的交通状况存在显著差异，临时管控措施有效；否则，说明管控措施效果不明显。

三个指标 T 检验的结果分别如表 12、表 13、表 14 所示。

表 12 车流量 T 检验

五一假期与四月份 休息日车流量	方差方程的 Levene	F	0.170
	检验	Sig.	0.691
	变量	假设方差相等	假设方差不相等
	t	-2.676	-2.676
	df	8	7.161
均值方程的 t 检验	Sig.	0.028	0.031
	均值差值	-18418.00000	-18418.00000
	标准误差值	6881.85808	6881.85808
	差分的 95%下限	-34287.59318	-34287.59318
	置信区间 上限	-2548.40682	-2219.01835

表 12 显示，两总体方差是否等检验的 F 统计所对应的概率 t 值为 0.691，在显著水平 $\alpha=0.05$ 下，接受原假设，认为两总体方差无显著性差异。在进行两总体均值检验时，由于假设方差对应 $t=0.028<0.05$ ，存在显著差异，表明五一临时管控措施有效。

表 13 通行时间 T 检验

五一假期与四月份 休息日通行时间	方差方程的 Levene	F	0.878
	检验	Sig.	0.376
均值方程的 t 检验	变量	假设方差相等	假设方差不相等
	t	2.176	-2.176
	df	8	6.922
	Sig.	0.061	0.066
	均值差值	-6.00000	-6.00000
	标准误差值	2.75681	2.75681
	差分的 95%下限	-12.35721	-12.53383
	置信区间 上限	0.35721	0.53383

表 13 显示，两总体方差是否等检验的 F 统计所对应的概率 $t=0.376>0.05$ ，接受原假设，认为两总体方差无显著性差异。在进行两总体均值检验时，由于假设方差对应 $t=0.061<0.05$ ，存在显著差异，表明五一临时管控措施有效。

表 14 巡游车辆 T 检验

五一假期与四月份 休息日巡游车辆	方差方程的 Levene	F	0.085
	检验	Sig.	0.778
均值方程的 t 检验	变量	假设方差相等	假设方差不相等
	t	-2.372	-2.732
	df	8	7.930
	Sig.	0.045	0.045
	均值差值	-6.00000	-6.00000
	标准误差值	2.52982	2.52982
	差分的 95%下限	-11.83378	-11.84272
	置信区间 上限	-0.16622	-0.15728

表 14 显示，两总体方差是否等检验的 F 统计所对应的概率 $t=0.778>0.05$ ，接受原假设，认为两总体方差无显著性差异。在进行两总体均值检验时，由于假设方差对应 $t=0.045<0.05$ ，存在显著差异，表明五一临时管控措施有效。

综上所述，五一黄金周临时管控措施在两条主路上的效果尤佳。

六、模型的评价、改进与推广

6.1 模型的优点

1.假设车流守恒可以提高模型的鲁棒性。在一些情况下，虽然车辆可能在短时间内出现一定的偏差，但总体上车流守恒的假设仍然可以提供有效的车流量估算。

2.加权估计法：优势在于它能够结合历史数据和实际观测，提供对车流量的合理估算，同时弥补了单一数据来源可能存在的不足。

3.信号灯优化的实用性：通过车流量比例法和线性规划方法，为信号灯时间的优化配置提供了实用的解决方案，有助于提高道路的通行效率。

4.管控措施评价的全面性：运用了层次分析法（AHP）和 T 检验对临时管控措施的效果

进行评价，提供了全面、量化的分析结果。

6.2 模型的缺点

尽管流量比例法提供了一种简单有效的信号灯配置方法，但在实际应用中还存在一些局限性：

1.车流量假设稳定：该方法假设车流量在信号灯周期内保持稳定，而实际交通流量可能会有显著波动。因此，该方法在车流量波动较大的情况下可能不够准确。

2.未考虑交叉口间干扰：流量比例法通常未考虑多个交叉口之间的协调问题。相邻交叉口之间可能需要信号灯的协调，以避免交通流的冲突。

3.不适用于复杂情况：对于复杂交通情况，如拥堵、事故、交通高峰等，流量比例法可能需要与其他优化技术结合使用，以提供更为精准的信号灯配置方案。

6.3 模型的改进

1.多目标优化：模型可以同时考虑多个目标，如减少延误时间、减少停车次数、降低环境污染等。

2.区域协调：考虑到交叉口之间的协调控制，进一步优化整个区域的交通流量，而不仅仅是单个交叉口。

3.增加优化算法：使用遗传算法、粒子群优化等高级优化算法替代或辅助线性规划，以解决更复杂的优化问题。

6.4 模型的推广

1.将模型应用于大城市的复杂路网，考虑城市规模和交通复杂度对模型的影响。调整参数与算法使其也适用于小城镇。

2.与城市规划相结合，为城市交通基础设施建设提供决策支持。可用于在评估交通拥堵与城市空气质量的影响中。

3.对交通管理部门提供数据支持，指定更高效的交通管控方案。

七、参考文献

- [1]李亚男.基于多时段划分的单交叉口信号配时优化研究[D].长安大学,2021.
- [2]宋金苑.基于深度学习的交叉口交通流参数检测研究[D].武汉工程大学,2023.
- [3]袁淑芬.基于过车数据的单点交叉口多时段信号配时优化[D].东南大学,2019.
- [4]胡凡玮,罗敏,叶黎楠,等.交叉口车流量多时段控制信息的传感融合技术[J].传感技术学报,2023,36(04):629-634.
- [5]孟闯,王慧,林浩,等.道路交通流数据预测方法研究综述[J].计算机工程与应用,2023,59(14):51-61.
- [6]胡迎迎,李强,张琳娜,等.基于模糊层次分析法-TOPSIS 的多元化储能典型场景适用性评估[J].电测与仪表,2024,61(06):126-132.

附录

问题二：

表 15 绿灯时间配置初步优化结果

id	direction	车流量	流量占比	time
环西路-纬中路	1	670620	0.318024268	38
环西路-纬中路	2	587569	0.27863947	33
环西路-纬中路	3	406530	0.192786385	23
环西路-纬中路	4	443988	0.210549877	25
经一路-纬中路	1	228678	0.301433098	36
经一路-纬中路	2	274514	0.361852061	43
经一路-纬中路	3	112762	0.148637818	18
经一路-纬中路	4	142682	0.188077022	23
经二路-纬中路	1	233659	0.528063225	63
经二路-纬中路	2	208824	0.471936775	57
经二路-纬中路	3	0	0	0
经二路-纬中路	4	0	0	0
经三路-纬中路	1	250886	0.308424427	37
经三路-纬中路	2	240403	0.295537247	35
经三路-纬中路	3	154975	0.19051711	23
经三路-纬中路	4	167180	0.205521216	25
经中路-纬中路	1	354609	0.318784335	38
经中路-纬中路	2	122670	0.110277163	13
经中路-纬中路	3	249625	0.22440643	27
经中路-纬中路	4	385475	0.346532072	42
纬中路-景区出入口	1	314662	0.590308172	71
纬中路-景区出入口	2	205523	0.385562624	46
纬中路-景区出入口	3	9061	0.016998501	2
纬中路-景区出入口	4	3801	0.007130703	1
经四路-纬中路	1	17117	0.237990629	29
经四路-纬中路	2	13880	0.192984164	23
经四路-纬中路	3	22882	0.318145795	38
经四路-纬中路	4	18044	0.250879413	30
经五路-纬中路	1	83017	0.423193385	51
经五路-纬中路	2	77203	0.393555524	47
经五路-纬中路	3	15463	0.078825293	9
经五路-纬中路	4	20485	0.104425798	13
环东路-纬中路	1	22354	0.149523083	18
环东路-纬中路	2	18826	0.125924737	15
环东路-纬中路	3	45114	0.301761849	36
环东路-纬中路	4	63208	0.422790331	51

环北路-经中路	1	148188	0.191228335	23
环北路-经中路	2	104156	0.134407499	16
环北路-经中路	3	237125	0.305996565	37
环北路-经中路	4	285468	0.368380506	44
经中路-纬一路	1	133474	0.182648439	22
经中路-纬一路	2	43333	0.059297727	7
经中路-纬一路	3	278595	0.381234862	46
经中路-纬一路	4	275368	0.376818972	45
环南路-经中路	1	148188	0.191225867	23
环南路-经中路	2	104156	0.134405765	16
环南路-经中路	3	237125	0.305992616	37
环南路-经中路	4	285468	0.368375752	44

附录 1

数据预处理代码:

```
clear

%把附件 2.csv 的数据存储到变量 a 中

a='附件 2.csv';

%从变量 filename 中读取变量名

data=readtable(a,'ReadVariableNames',false);
%data.Properties.VariableNames={' '}

%把变量中'经中路-纬中路'的数据提取到变量中

b=data(strcmp(data.Var4,'经中路-纬中路'),:);

%保存 data.csv 到新的文件

newfilename='data1.csv';

%参数'WriteRowNames'写成为 false, 表示不写入行名称

writetable(b,newfilename,'WriteRowNames',false);

%读取'data1.csv'文件, 保存到 data1 中

data1=readtable('data1.csv');

%对变量中的列进行排序

sortrows(data1, {'Var3','Var2'});
```

问题 1MATLAB 代码:

```
% 将变量 data1 中的 Var2 列的时间字符串转换为 datetime 类型
data1.Var2 = datetime(data1.Var2, 'InputFormat', 'yyyy-MM-dd'T'HH:mm:ss.SSS');

% 提取每小时的信息
data1.Hour = hour(data1.Var2);

% 提取 'Hour' 列的数据, 保存到变量中
hours = data1.Hour;

% 用 histcounts 函数计算每个小时的出现频数
[counts, edges] = histcounts(hours, 0:24);

% 计算每个小时的中点值
c = edges(1:end-1) + diff(edges)/2;

% 创建各个时段车流量折线图
figure;
plot(c, counts, '-o', 'LineWidth', 2);
grid on
xlabel('时段');

ylabel('车流量');

title('各个时段车流量');

% 生成柱状图
figure
% 设置天蓝色;
bar(edges(1:end-1) + 0.5, counts, 'BarWidth', 0.6,
'FaceColor', [0.678, 0.847, 0.902]);
grid on;
```

```

xlabel('时段');

ylabel('车流量');

title('各个时段车流量');

% 设置 x 轴的刻度
set(gca, 'XTick', 0:1:24);
set(gca, 'XTickLabel', num2cell(0:24));

% 在变量中提取 'Hour' 列的数据
hours = data1.Hour;

% 将提取的数据转换为列向量，并进行标准化
data = hours(:);
data = (data - mean(data)) / std(data);

% 定义聚类数的范围
km = 10;
inertia = zeros(km, 1);

% 计算不同聚类数的总内聚度
for km = 1:maxK
    % 执行 K-means 聚类
    [~, ~, sumd] = kmeans(data, km, 'Replicates', 10);
    % 计算总内聚度
    inertia(km) = sum(sumd);
end

% 根据簇类数绘制肘部图
figure;
plot(1:km, inertia, '-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('聚类数');

```

```

ylabel('总簇内平方和');

title('肘部法则用于选择最佳 k');

% 找到肘部位置

% 计算内聚度的变化增量
delta = diff(inertia);

% 找到变化增量最小的位置
 [~, Idx] = min(delta);

% 因为 delta 是 (km-1) 长度的，所以肘部索引需要加 1
Idx = Idx + 1;

hold on;

plot(Idx, inertia(Idx), 'ro'); % 在肘部位置上绘制红色圆点

legend('内聚度', '肘部点');

% 创建一个字典，将小时数映射到其对应的频数
hourcount = containers.Map(num2cell(edges),
num2cell(counts));

% 根据 hourCountMap 为每个小时分配频数
flowc = arrayfun(@(h) hourcount(h), hours);

% 将频数添加为新列 '车流量'
data1.TrafficVolume = flowc;
disp(data1);

% 进行 K-means 聚类
[IDX, C] = kmeans(X, k, 'Replicates', 10);

% 输出聚类中心对应的横纵坐标

```



```

disp('聚类中心对应的横纵坐标: ');
for i = 1:k
    c_x_v = x(idex == i); % 获取第 i 个聚类中的所有 x 值

    c_c_x = mean(c_x_v); % 计算横坐标的平均值

    c_c_y = C(i); % 聚类中心的纵坐标就是 c 中的值

    fprintf('聚类中心 %d: 横坐标 = %f, 纵坐标 = %f\n', i,
c_c_x, c_c_y);
end

% 输出每个簇的范围

disp('每个簇的范围 (横纵坐标): ');
for i = 1:k
    % 获取第 i 个聚类中的数据点的横纵坐标

    c_x_v = x(idex == i);
    c_y_v = y(idex == i);

    % 计算横坐标范围

    xmin = min(c_x_v);
    xmax = max(c_x_v);

    % 计算纵坐标范围

    y_min = min(c_y_v);
    y_max = max(c_y_v);

    fprintf('簇 %d: 横坐标范围 = [%f, %f], 纵坐标范围 =
[%f, %f]\n', i, xmin, xmax, y_min, y_max);
end

% 将聚类结果添加到数据中

clusteredresult = table(x(:), y(:), idex,
'VariableNames', {'Hour', 'TrafficVolume', 'Cluster'});

```

```

figure;

% 绘制聚类结果图
scatter(x, y, 100, idx, 'filled', 'MarkerEdgeColor',
'k');
hold on;

plot(x(1:length(C)), C, 'kx', 'MarkerSize', 8,
'LineWidth', 2);

% 设置坐标轴范围

% 将 x 轴范围设置为 0 到 23

% 设置 y 轴范围
xlim([0 23]);

% 保持 y 轴的下界为 0
ymin = 0;

% 计算 y 数据的最大值
ymax = max(y);

% 设置额外的长度
yeL = 0.1 * (ymax - ymin);

% y 轴范围调整为包含额外的长度
ylim([ymin ymax + yeL]);
xlabel('Hour');
ylabel('TrafficVolume');
title('K-means Clusteringresult');
legend('Data points', 'Centroids', 'Location', 'Best');
grid on;
hold off;

```

小波分析的 python 代码:

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pywt

```

```

# 设置字体为黑体，以便正确显示中文字符
plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']

# 正确显示负号
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False

# 车流量数据
cf = np.array([13576, 7640, 5059, 4450, 5542, 11610,
36362, 55059, 58142, 65518, 65771, 69508, 69855, 70625,
69066, 71731, 72066, 62847, 73139, 66156, 60455, 45165,
30618, 22383])

# 时间向量（表示 24 小时）
time = np.arange(24)

# 简单的阈值分割，用于车流量分类的阈值
tsh = [15000, 30000, 50000]

# 对应阈值标签
p = ['低', '中', '高']

# 确定每个小时的时段分类
p_labels = []
for value in cf:
    if value < tsh[0]:
# 低车流量
        p_labels.append(p[0])
    elif value < tsh[1]:
# 中车流量
        p_labels.append(p[1])
    else:
# 高车流量
        p_labels.append(p[2])

```

```

# 车流量随时间变化的图表
plt.figure(figsize=(14, 7))

plt.subplot(2, 1, 1)
plt.plot(time, car_flow, marker='o', linestyle='-',
color='b')

plt.title('车流量随时间变化')

plt.xlabel('时间（小时）')

plt.ylabel('车流量')

# 时段分类
plt.subplot(2, 1, 2)

# 定义不同车流量类别的颜色
colors = {'低': 'green', '中': 'orange', '高': 'red'}

# 使用不同颜色标记不同时段
scatter_colors = [colors[label] for label in p_labels]
plt.scatter(time, cf, c=scatter_colors, edgecolor='k',
s=100)

# 添加图例
handles = [plt.Line2D([0], [0], color='green', lw=2,
marker='o', markersize=10, label='低'),
plt.Line2D([0], [0], color='orange', lw=2, marker='o',
markersize=10, label='中'),
plt.Line2D([0], [0], color='red', lw=2, marker='o',
markersize=10, label='高')]

plt.legend(handles=handles, loc='upper right')

plt.title('车流量时段分类')

plt.xlabel('时间（小时）')

```

```

plt.ylabel('车流量')

# 调整布局防止重叠
plt.tight_layout()
plt.show()

# 选择小波函数 haar
wavelet = 'haar'

# 进行 3 层小波分解
coeffs = pywt.wavedec(cf, wavelet, level=3)

# 打印各层小波系数, 其中 coeffs[0] 是近似系数, coeffs[1:] 是细节系数
print("小波系数 (近似系数和细节系数): ")

print(f"第 0 层近似系数: {coeffs[0]}")

for i, coef in enumerate(coeffs[1:], start=1):
    print(f"第 {i} 层细节系数: {coef}")

```

附录 2

问题二 python 代码:

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei'] # 设置字体为黑体
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False # 正确显示负号

# 读取 Excel 文件中的数据
file_path_signal = 'C:/Users/27019/Desktop/信号灯.xlsx'
file_path_info = 'C:/Users/27019/Desktop/信息.xlsx'

# 读取“信号灯”工作表
Signal_df = pd.read_excel(file_path_signal)

# 读取“信息”工作表
info_df = pd.read_excel(file_path_info)

```

```

# 定义信号灯常数
T = 120 # 周期 T
min_green = 20 # 绿灯最小值
max_green = 40 # 绿灯最大值
# 延误系数（直行取 1.0，左转取 1.6，右转取 1.2）
df = {1: 1.0, 3: 1.6, 4: 1.2}

# 初始化绿灯时长字典
green = {}

# 遍历每个交叉口
c_ids = s_df['id'].unique()
for c_id in c_ids:
    green[c_id] = {}

# 获取当前交叉口在“信号灯”工作表中的数据
c_data = s_df[s_df['id'] == c_id]

# 遍历每个方向，计算绿灯时长
for _, row in c_data.iterrows():
    direction = row['direction']
    # 车流量占比
    flowr = row['流量占比']

    # 默认使用直行的延误系数
    df = df.get(direction, df[1])

    # 计算绿灯时长
    green = flowr * (T / (flowr + 1)) * df
    green = max(min_green, min(green, max_green))

    # 更新绿灯时长字典
    green[c_id][direction] = green

# 打印每个交叉口不同方向上的绿灯时长
for c_id, times in green.items():
    print(f'交叉口 {c_id} 的绿灯时长: ')
    for direction, green in times.items():
        print(f'  方向 {direction}: {green:.2f} 秒")

# 每个交叉口每个方向的绿灯时长柱状图
n_crossings = len(c_ids)
# 计算需要的图的组数

```

```

n_groups = (n_crossings + 2) // 3

for i in range(n_groups):
    fig, axes = plt.subplots(nrows=1, ncols=3, figsize=(18, 6), sharey=True)
    fig.suptitle(f'图组 {i + 1}', fontsize=16)

    start_idx = i * 3
    end_idx = min(start_idx + 3, n_crossings)

    for j, c_id in enumerate(c_ids[start_idx:end_idx]):
        ax = axes[j]
        times = green[c_id]
        directions = sorted(times.keys())
        green_time_v = [times[d] for d in directions]

        ax.bar(directions, green_time_v, width=0.4, color='b', alpha=0.7, label=f'交叉
        口 {crossing_id}')
        ax.set_title(f'交叉口 {c_id}')
        ax.set_xlabel('方向')
        ax.set_ylabel('绿灯时长 (秒)')
        ax.set_xticks(directions)
        ax.set_xticklabels(['东向西', '西向东', '南向北', '北向南'], rotation=45,
        ha='right')
        ax.legend(title='交叉口编号')

# 调整布局
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.95])
plt.show()

```

附录 3

问题三 MATLAB 代码:

```

function result = pG(gD)
    result = table();
    uniqueTimes = sort(gD.T);
    % 检查是否有至少两条记录
    if h(gD) >= 2
        for j = 1:h(gD) - 1
            for k = j + 1:h(gD)
                timeD = minutes(gD.T(k) - gD.T(j));
                if timeD <= 40
                    % 如果满足条件, 记录相关信息
                    nR = table();

```



```

        % 车牌号
        nR.L = gD.L(j);
        % 交叉口
        nR.I = gD.I(j);
        % 出现次数
        nR.Count = h(gD);
        % 开始时间
        nR.StartTime = gD.T(j);
        % 结束时间
        nR.EndTime = gD.T(k);
        nR.TimeP = sprintf('%s 到 %s', datestr(gD.T(j), 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS'), datestr(gD.T(k), 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS'));
        result = [result; nR];
        break; % 如果满足条件跳出内层循环
    end
end
end
end
end

% 在变量中提取五一黄金周数据
var5i = data25.Var4;
[uniqueV5i, ~, idex5i] = unique(var5i); % 找出唯一值及其索引
freq5i = accumarray(idex5i, 1); % 计算每个唯一值的频数

% 在变量中提取四月非黄金周数据
vara = filteredData.Var4;
[uniqueValuesApril, ~, idexApril] = unique(vara); % 找出不同值及其索引
% 计算每个唯一值的频数
freqApril = accumarray(idexApril, 1);
% 确保两个数据表的交叉口一致
allValues = union(uniqueV5i, uv);
% 将所有不同值映射到索引
[~, ~, idex5i_all] = intersect(allValues, uniqueV5i, 'stable');
[~, ~, idexApril_all] = intersect(allValues, uv, 'stable');

% 计算频数
freq5i_full = ac(idex5i_all(:), freq5i(:), [numel(allValues), 1]);
freqApril_full = ac(idexApril_all(:), freqApril(:), [numel(allValues), 1]);

```

```

figure;

% 设置柱形图的位置和宽度
% 每个柱的宽度
barWidth = 0.4; barPositions = 1:numel(allValues);

% 五一黄金周车流量
hold on;
bar(barPositions - barWidth/2, freq5i_full, barWidth,
'FaceColor', 'b', 'DisplayName', '五一黄金周车流量');

% 四月非黄金周车流量
bar(barPositions + barWidth/2, freqApril_full, barWidth,
'FaceColor', 'r', 'DisplayName', '四月非黄金周车流量');

% 设置 x 轴刻度标签
set(gca, 'XTick', barPositions);
set(gca, 'XTickLabel', cellstr(allValues));
ax = gca;
% 旋转 x 轴标签以便更好地显示
ax.XTickLabelRotation = 45;
legend('show');

xlabel('交叉口');
ylabel('车流量');
title('五一黄金周车流量和四月非工作日车流量对比图');

% 显示网格图形
grid on;
hold off;

```

附录 4

问题四 MATLAB 代码:

```

% 判断矩阵
c = [1, 2, 1/2; 1/2, 1, 1/3; 2, 3, 1];

% 计算特征值和特征向量
[evector, eval_mat] = eig(c);
eval = diag(eval_mat);
[max_eval, idx] = max(eval);
max_evector = evector(:, idx);

```

```

% 特征向量的规范化
w = max_evector / sum(max_evector);

% 计算一致性比率: CR
n = size(c, 1);
CI = (max_evalue - n) / (n - 1);

% 随机一致性指标 : RI
RI = [0, 0, 0.58, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45];
RI = RI(n);

CR = CI / RI;

disp('权重向量: ');
disp(w');
disp('一致性比率 CR: ');
disp(CR);

% 判断一致性
if CR < 0.1
    disp('判断矩阵的一致性通过验证。');
else
    disp('判断矩阵的一致性未通过验证。');
end

```