

校园共享单车的调度与维护问题解决

摘要

本文研究校园共享单车故障车辆回收问题，旨在优化回收路径与时间，提升回收效率。针对共享单车总量及故障车辆估算问题，本文综合低谷时段停车点车辆数、核密度估计与粒子群优化，建立混合估算模型。运用时间序列分析与统计优化方法，精准评估校园共享单车总量及各停车点故障车辆数。

在回收路径规划中，考虑到停车点的地理位置、故障车辆数量分布以及回收车辆的运载能力，本文将问题转化为典型的车辆路径规划问题（VRP）。借助遗传算法，以回收时间为优化目标，构建路径规划模型。模型通过编码染色体表示不同的回收路径，利用遗传算子模拟自然选择过程，不断进化寻找最优解。计算得出回收任务的时间安排与路径顺序，使回收时间显著缩短，故障车辆比例有效降低。

针对停车点布局优化问题，本文引入差分进化算法，优化停车点的空间布局。综合停车点的覆盖度、需求满足率以及调整幅度，设计目标函数。运用差分进化算法的变异、交叉和选择操作，全局搜索最优布局方案。优化后，停车点布局更加合理，综合评分显著提升。

本文模型具有创新性和实用性。创新之处在于融合多种技术：混合估算模型结合低谷时段统计、核密度估计和粒子群优化，提高共享单车总量及故障车辆数的估算精度；遗传算法与差分进化算法分别用于路径规划和布局优化，提升求解效率与准确性。模型实用性体现在可为高校或共享单车运营企业提供决策支持，优化故障车辆回收流程，提高共享单车运营效率和服务质量。

关键词：路径规划 粒子群优化（PSO） 2-opt算法 蚁群优化（ACO） 资源分配

目录

摘要.....	1
一、 问题重述.....	3
1.1 问题背景.....	3
1.2 解决问题.....	3
二、 问题分析.....	3
三、 模型假设.....	4
3.1 动态供需模型假设.....	4
3.2 空间分布模型假设.....	5
3.3 运维路径优化模型假设.....	5
四、 符号说明.....	5
五、 模型建立.....	7
5.1 问题 1 的模型建立与求解方法详解.....	7
5.2 问题 2 的模型建立与求解方法详解.....	9
5.3 问题 3 的模型建立与求解方法详解.....	17
5.4 问题 4 的模型建立与求解方法详解.....	20
六、 模型检验.....	23
6.1 结果正确性分析与检验：.....	23
6.2 模型合理性分析与检验.....	23
七、 模型评价.....	24
7.1 模型优点.....	24
7.2 模型缺点.....	24
7.3 改进方法.....	25
7.4 模型灵敏度分析.....	25
八、 模型推广.....	25
8.1 城市共享单车运营.....	25
8.2 物流配送领域.....	25
九、 参考文献.....	26

一、问题重述

1.1 问题背景

共享单车作为高校“最后一公里”的核心解决方案，在提升校园出行效率的同时，也面临复杂的管理挑战。某高校通过引入共享单车缓解交通压力，但实际运营中暴露出以下问题：

1. 动态供需失衡：高峰时段（如上下课、用餐时间）部分区域车辆紧缺，而低峰时段车辆堆积，导致资源浪费。
2. 空间分布不均：停车点布局未充分考虑学生活动规律，如宿舍区与教学楼的衔接不足，食堂周边容量冗余。
3. 运维效率低下：故障车辆回收依赖人工巡检，路径规划不科学，导致故障积压，影响用户体验。

学生团队通过多时段数据采集（附件 1）和校园地图（附件 2），需结合数学建模提出系统性优化方案，实现“调度-布局-维护”全链条的精细化管控。

1.2 解决问题

- 1.共享单车总量及数量分布估算
- 2.共享单车需求模型及调度模型建立
- 3.运营效率评估与停车点优化
- 4.故障车辆的运送与检修路线优化

二、问题分析

针对共享单车在高校运营中存在的动态供需失衡、空间分布不均、运维效率低下等问题，需构建相应的模型来解决。

对于动态供需失衡问题，这是由于不同时段用户对共享单车的需求存在差异，而车辆的供给未能及时匹配需求变化所导致。为了解决该问题，需要建立一个能够预测不同时段各停车点车辆需求的模型，以便合理调配车辆资源。考虑到单车数量随时间的变化具有一定的规律性，可采用时间序列分析模型，对历史数据进行分析，提取出周期性特征和趋势信息，进而预测未来的车辆需求。模型的简化在于假设车辆需求主要受时间因素影响，忽略其他复杂因素如突发活动等，在求解时，利用统计软件对时间序列数据进行拟合和预测，得出不同时间段的车辆需求预测值，从而为调度决策提供依据。

空间分布不均问题的产生，是因为停车点的布局未充分考虑学生的实际活动规律和出行需求。需要构建一个空间分析模型，确定停车点的合理位置和容量。基于校园地图和学生流量数据，利用地理信息系统（GIS）的空间分析功能，结合聚类算法，识别出学生出行的热点区域和交通流量大的节点，以此为依据规划停车点的位置和规模。在简化问题时，假设学生的出行主要集中在固定的热门区域，且出行路径相对稳定。在求解过程中，通过聚类算法对停车点选址进行优化，使停车点能够覆盖主要的出行需求区域，提高车辆的空间分布均匀性。

运维效率低下主要是因为故障车辆回收依赖人工巡检，路径规划不科学。针对此问题，需建立车辆回收路径优化模型。以校园地图为载体，获取各故障车辆位置信息，将回收任务转化为一个车辆路径规划问题。假设回收车辆的速度相对稳定，且校园道路网络为已知。在求解方法上，运用启发式算法如蚁群算法或遗传算法，寻找最优的回收路径，使得回收车辆在最短时间内完成故障车辆的回收任务，提高运维效率。

三、模型假设

3.1 动态供需模型假设

假设车辆需求仅受时间因素影响，不考虑短期内的突发活动、天气变化等特殊因素对需求的冲击。这是基于高校内共享单车的使用主要受日常作息规律影响，如上下课、用餐时间等，长期来看，这些时间规律下的需求占主导地位，其他因素的干扰相对较小且相对随机，可忽略不计。

假设时间序列数据具有稳定性和周期性，即过去的车辆需求变化模式能够反映未来的趋势。从实际观察来看，高校的作息安排相对固定，不同学期、不同周次在相同时间段的共享单车需求呈现出一定的相似性，因此可以利用历史数据中的周期性规律来预测未来的车辆需求。

3.2 空间分布模型假设

假设学生的出行需求集中在有限的几个热点区域，如教学楼、宿舍、食堂、图书馆等，且这些热点区域之间的出行流量占比较大。高校校园的功能分区较为明确，学生的主要活动通常围绕这些核心区域展开，通过分析学生流量数据，可以确定主要的出行热点，从而简化停车点布局问题。

假设校园内的道路网络结构相对稳定，在规划停车点布局时，不考虑短期内的道路施工、封闭等临时性变化对停车点选址的影响。校园的道路规划一般具有一定的长期稳定性，在局部区域可能存在的道路调整对整体的停车点布局影响有限，因此可以基于当前的道路网络进行停车点的合理布设。

3.3 运维路径优化模型假设

假设回收车辆的行驶速度恒定，且不受交通拥堵等因素的影响。在校园内，车辆行驶速度相对较低且道路拥堵情况较少，尤其是在非上下课高峰期，校园道路通常能够保证车辆的顺畅通行，因此可以近似认为回收车辆在各路段的行驶时间与距离成正比，以简化路径优化问题。

假设故障车辆的分布位置和数量为已知，在每次回收任务开始前，能够准确获取所有故障车辆的位置信息和报修数量，以便进行统一的路径规划。考虑到校园内的共享单车通常配备有定位系统，且故障报修信息可以通过用户反馈及时获取，因此可以合理假设在一定时间范围内，故障车辆的相关信息是确定的。

四、符号说明

符号	含义	类型	量纲
t	时间变量，表示不同的时间段	时间变量	小时（h）或分钟（min）
$x(t)$	时间 t 时某停车点的单车数量	数量变量	辆
N	共享单车的总量	数量变量	辆
α	流动性因子，车辆在停车点之间的转移概率	概率因子	无量纲
$x_{i,t}$	停车点 i 在时间 t 的车辆数	数量变量	辆
T	回收车辆的任务总时间	时间变量	小时（h）或分钟（min）
d_{ij}	停车点 i 到停车点 j 的距离	距离变量	米（m）
Q	回收车辆的容量	容量变量	辆
v	回收车辆的行驶速度	速度变量	米/分钟（m/min）或米/小时（m/h）
n	停车点的总数	数量变量	个
N_{static}	静态估算的共享单车总量（低谷时段各停车点车辆数总和）	数量变量	辆
$N_{density}$	核密度估计得到的车辆数	数量变量	辆
N_{opt}	粒子群优化（PSO）得到的共享单车总量	数量变量	辆

ω_i	各估算方法的误差权重	权重系数	无量纲
Q1	下四分位数	统计量	辆
Q3	上四分位数	统计量	辆
IQR	四分位距 (Q3 - Q1)	统计量	辆
ω	加权移动平均的时间窗口大小	窗口参数	个 (时间点)
α_{min}	动态安全边际的最小安全阈值	阈值系数	无量纲

五、模型建立

5.1 问题 1 的模型建立与求解方法详解

5.1.1 数据预处理与插值

采用 PCHIP（分段三次 Hermite 插值多项式）对离散时间点的单车数量进行插值，生成连续时间序列数据。对于每个停车点的时间序列数据，设已知时间点 t_1, t_2, \dots, t_n 为对应车辆数为 x_1, x_2, \dots, x_n 。PCHIP 通过分段三次多项式 $H(t)$ 连接相邻点，满足以下条件：

1. 单调性保持：若相邻点 (t_i, x_i) 与 (t_{i+1}, x_{i+1}) 单调递增/递减，则插值函数在区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 内也保持相同单调性；

2. 一阶导数连续：插值函数 $H(t)$ 在节点处一阶导数连续，避免“龙格现象”。

插值后的每小时车辆数为：

$$x_{\text{interp}}(t) = H(t), \quad t \in [7:00, 23:00]$$

应用场景：填充缺失时段（如 8:00、10:00 等）的单车数量，为后续分析提供连续数据支持。

5.1.2 共享单车总量估算

结合核密度估计（KDE）与粒子群优化（PSO），从静态和动态两个维度估算总量。

1. 静态估算：选取低谷时段（如 23:00）各停车点车辆数总和

$$N_{static} = \sum_i x_{i,23:00}$$

2. 动态修正：

核密度估计：将各停车点不同时间的车辆数视为样本，估计总体密度分布：

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

其中 K 为核函数（如高斯核），h 为带宽。取密度最高点对应的车辆数 Ndensity。

PSO 优化：定义目标函数为最小化预测值与实际数据的均方误差（MSE）：

$$\text{Minimize MSE} = \frac{1}{T} \sum_t \left(\sum_i x_{i,t}^{\text{pred}} - \sum_i x_{i,t}^{\text{obs}} \right)^2$$

优化变量为总量 N 和流动性因子 α （每小时车辆转移概率），约束条件为

$N \in [N_{static}, 1.2N_{static}]$, $\alpha \in [0.1, 0.5]$ 。

3. 加权综合：结合静态估算 Nstatic、核密度估计 Ndensity、PSO 优化结果 Nopt，按误差权重计算最终总量：

$$N_{total} = \omega_1 N_{static} + \omega_2 N_{density} + \omega_3 N_{opt}$$

权重 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 由各方法的置信度确定（如核密度估计的置信区间宽度）。

5.1.3 停车点数量分布建模

构建马尔可夫链模型，模拟车辆在停车点间的转移过程。

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + \alpha \sum_{j \neq i} x_{j,t} - \alpha(n-1)x_{i,t}$$

设 $x_{i,t}$ 为停车点 i 在时间 t 的车辆数， α 为流动性因子（每小时转移概率），则动态方程为：

其中 n 为停车点总数。模型假设车辆从每个停车点以概率 α 转移至其他任意停车点。

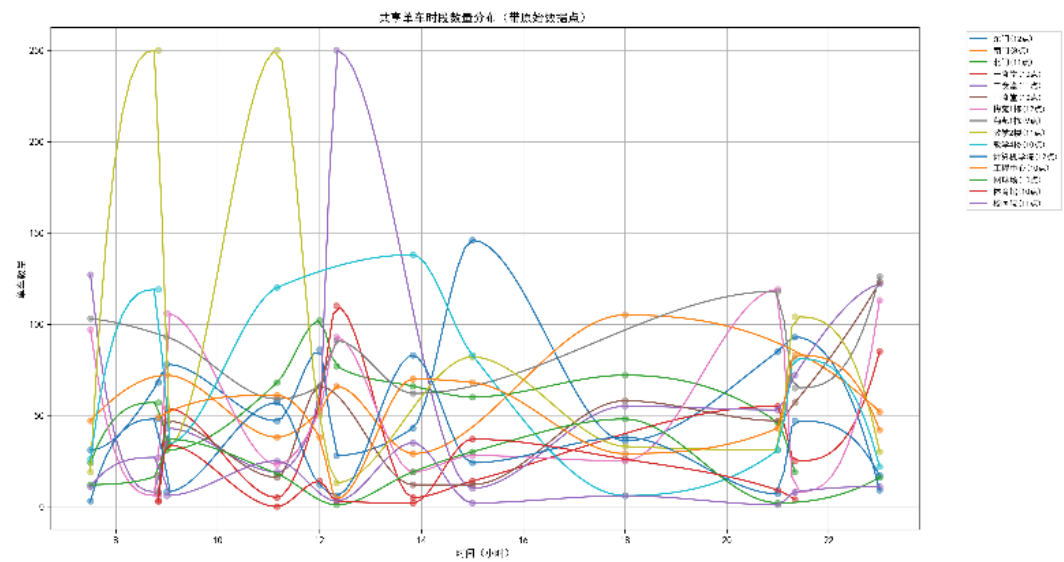
通过实际数据计算均方误差（MSE）：

$$\text{MSE} = \frac{1}{T \cdot n} \sum_{t,i} \left(x_{i,t}^{\text{pred}} - x_{i,t}^{\text{obs}} \right)^2$$

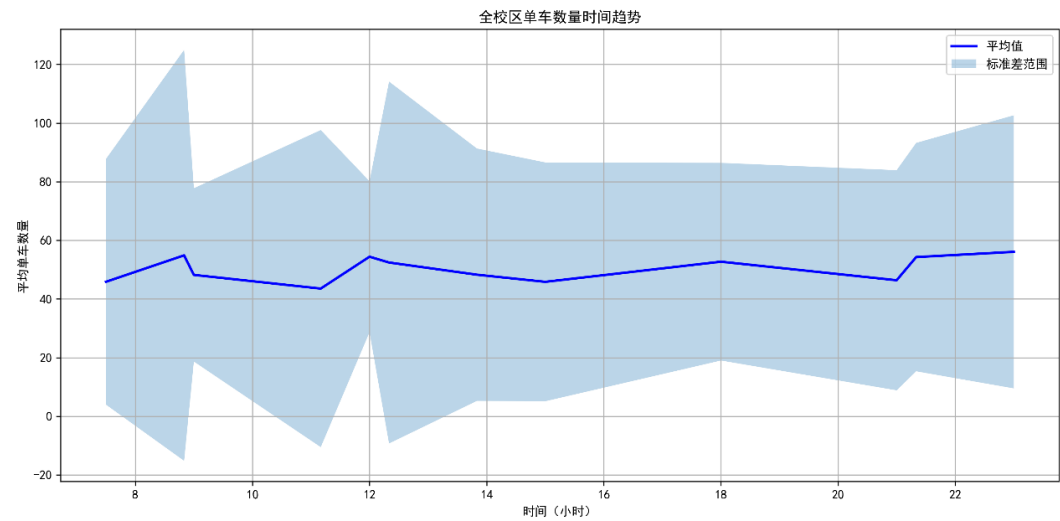
若 MSE 较大，可引入时空权重因子，例如教学楼在课间流动性更高，修正 α 为时变参数 $\alpha(t)$ 。

5.1.4 结果输出与可视化

基于插值和模型预测结果，填充表 1，并生成分布图与趋势图。



上图展示了各停车点车辆数随时间波动，横轴为时间，纵轴为车辆数，不同颜色表示不同停车点。



上图展示了

全校区平均车辆数随时间变化，叠加标准差范围（阴影区域），反映整体调度需求。

5.2 问题 2 的模型建立与求解方法详解

5.2.1 用车需求模型

1.采用箱线图法（IQR 准则）对原始数据进行清洗，消除极端值对需求预测的干扰：对于每个时间点 t 的单车数量 x ,计算其下四分位数 $Q1$ 和上四分位数 $Q3$ ，定义异常值范围为：

$$\text{合理区间}=[Q1-1.5\times IQR, Q3+1.5\times IQR]$$

其中 $IQR=Q3-Q1$,超出该范围的值将被截断至区间边界。

2.基于加权移动平均预测各停车点的用车需求。设时间窗口大小为 ω ，权重向量为 $\omega=[\omega_1,\omega_2, \dots,\omega_\omega]$ ，则第 t 个时间点的预测值为：

$$\hat{x}_t=\sum_{k=1}^{\omega}\omega_k\cdot x_{t-k+1}$$

其中 $\sum \omega_k=1$ ，默认权重为 $[0.5,0.3,0.2]$ ，赋予近期数据更高权重。

3.在预测需求基础上引入动态安全边际，考虑需求波动性。安全边际系数 α 由需求波动率（标准差与均值之比）和最小安全阈值 α_{min} 共同决定：

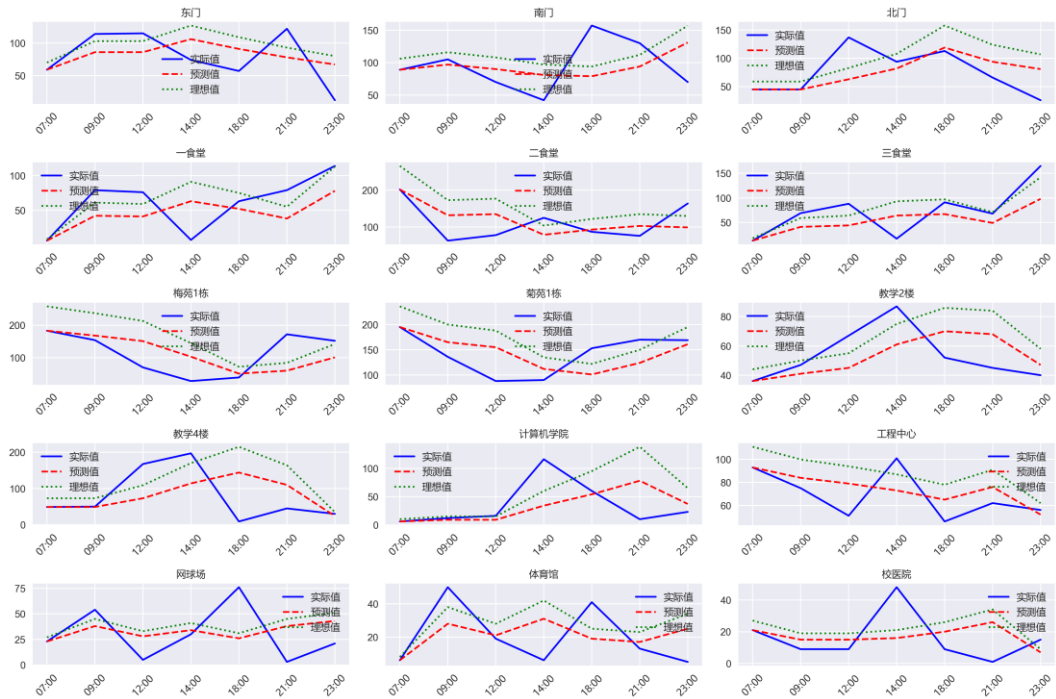
$$\alpha=\max\left(\alpha_{min},\frac{\sigma}{\mu}\right)$$

理想配置值 x_{ideal} 为： $x_{ideal}=\hat{x}\times(1+\alpha)$

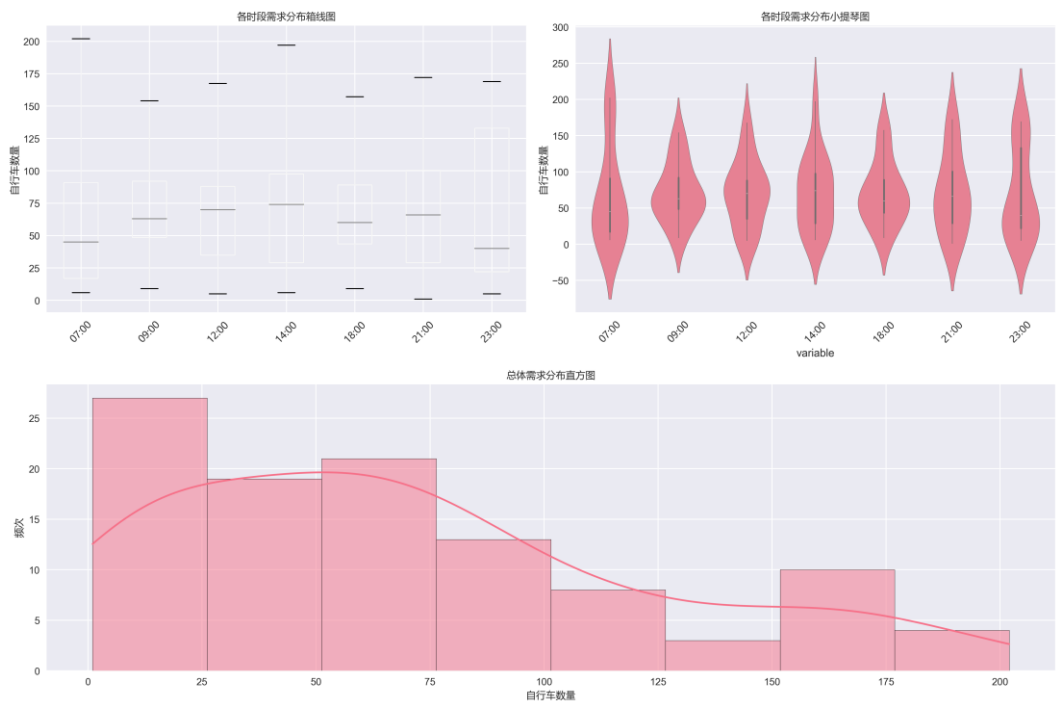
4.采用平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）量化预测精度。

$$MAE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\left|x_i-\hat{x}_i\right|$$
$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\left(x_i-\hat{x}_i\right)^2}$$

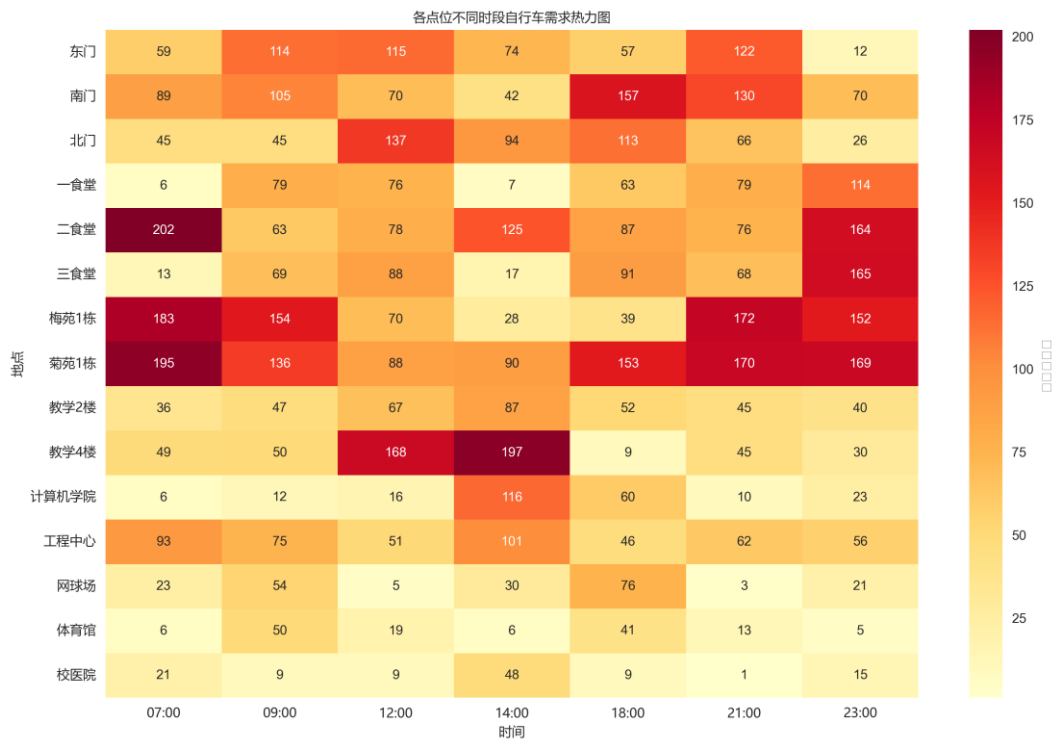
5.可视化分析



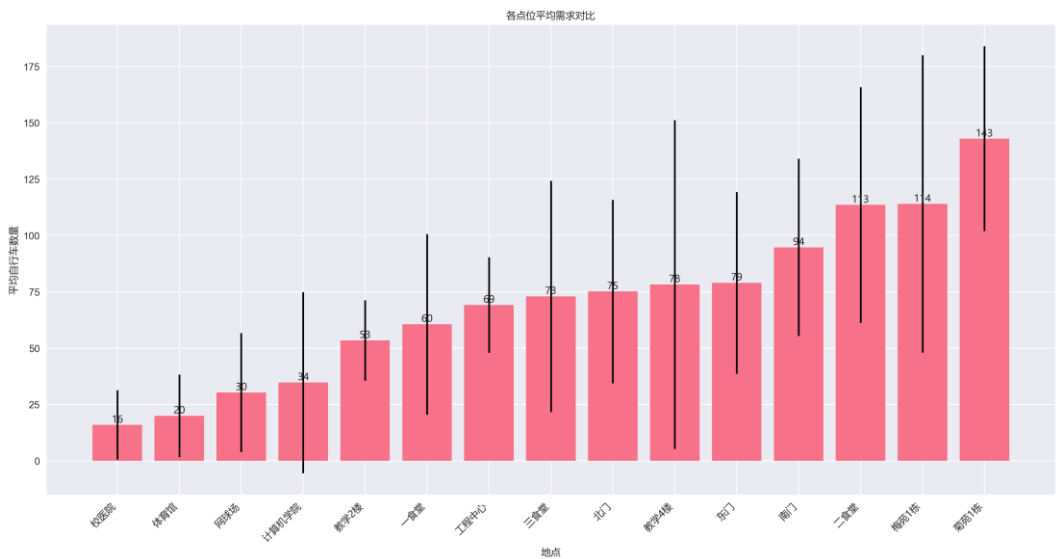
上图为多地点时段需求折线图，展示了东门、南门、北门、一食堂、二食堂等地点在不同时段（07:00 - 23:00）的实际值（蓝色）、预测值（红色）、理想值（绿色）变化。例如，二食堂在 07:00 实际值显著高于预测值与理想值，反映该时段需求的特殊性。



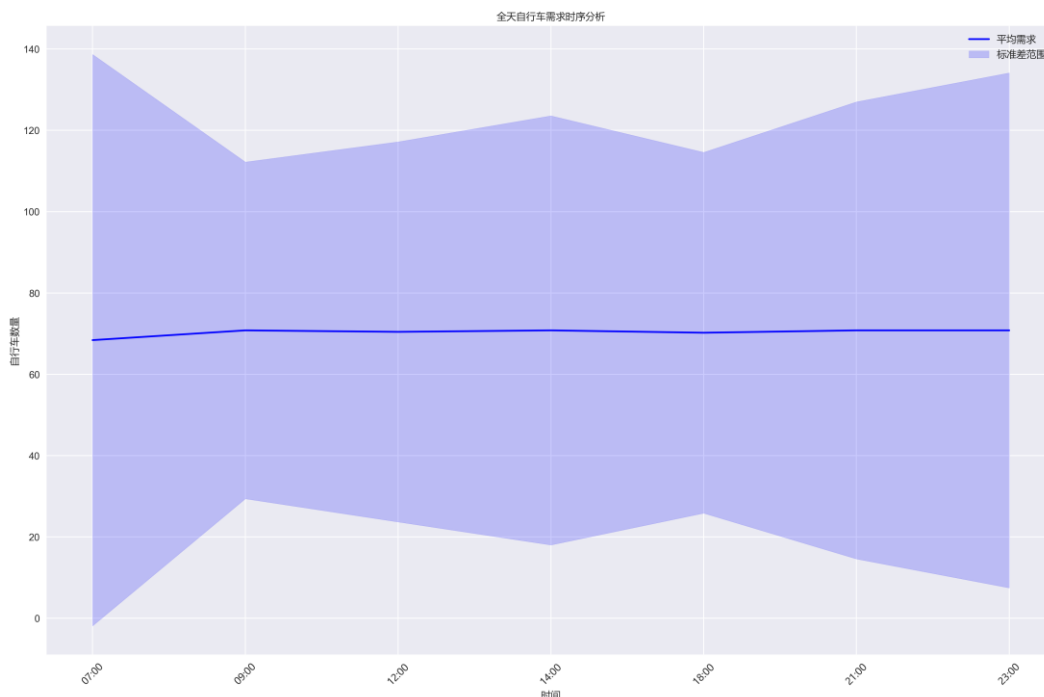
上图为需求分布统计图表，其中箱线图展示了各时段（07:00 - 23:00）自行车需求分布，通过中位数、四分位数等反映数据集中趋势与离散程度；小提琴图更细致呈现各时段需求分布形态，如 07:00 需求分布集中且较高。直方图展现总体需求分布显示共享单车数量的频次，红色曲线为拟合分布，揭示需求集中区间（如 0 - 25 数量段频次最高）。



上图为各点位时段需求热力图，其中行代表地点（如东门、南门、二食堂等），列代表时间（07:00 - 23:00），颜色深浅表示需求数值（如二食堂 07:00 需求达 202，颜色最深），直观呈现不同地点在各时段的需求热度。



上图为各点位平均需求对比柱状图，其中横轴为地点（校医院、体育馆、菊苑 1 栋等），纵轴为平均共享单车数量。菊苑 1 栋平均需求最高（143），校医院最低（16），清晰对比各点位需求差异。



上图为全天共享单车需求时序分析图，其中蓝色线为平均需求（稳定在约 70），紫色区域为标准差范围，显示 07:00 需求波动大，14:00 相对平稳，反映全天需求的时序特征与波动情况。

5.2.2 地图建模过程

1. 使用 `MapProcessor` 类初始化地图，加载附件 2，将图像从 BGR 转换为 RGB 格式，初始化存储停车点、路线和比例尺的变量。比例尺基于地图底部的标注“2000m”，通过图片高度像素值与实际 2000 米的比例计算得到。

2. 使用 HSV 颜色空间检测黄色区域，通过自适应阈值和形态学操作优化掩码，最后用霍夫变换提取直线段。将图像从 RGB 转换到 HSV，定义黄色的 HSV 范围

（`lower_yellow=[20,50,150]`, `upper_yellow=[35,255,255]`）。使用高斯窗口（`window_size=51`）增强局部对比度，提取连续路线。形态学操作：闭运算填充空洞，开运算消除噪声。检测直线段，合并成路线。

3. 合并相邻且共线的路线段，基于端点距离和夹角阈值（默认 `distance_threshold=20` 像素，`angle_threshold=30` 度）。计算两条线段的端点距离和夹角，若满足阈值则合并。使用 `numpy` 数组加速计算，避免重复合并。

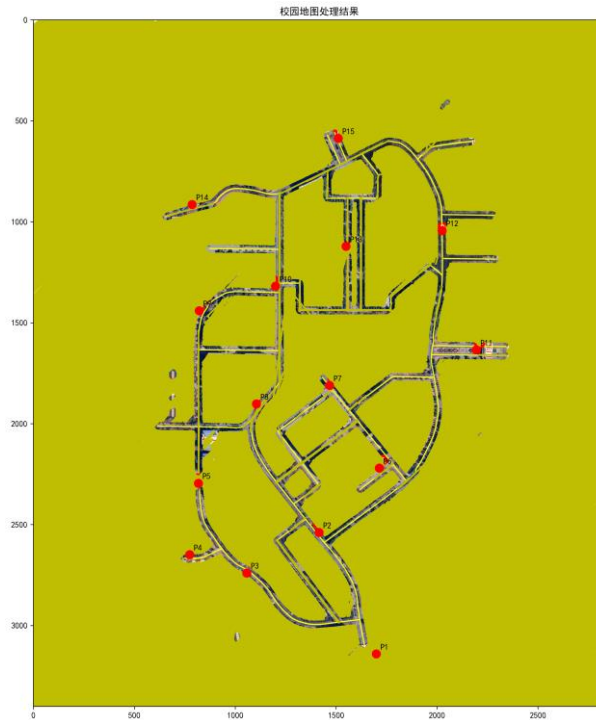
4. 通过左键点击添加停车点（自动命名如 P1, P2...），右键点击删除最近点。

使用 matplotlib 的交互功能，绑定鼠标事件 `button_press_event`。坐标保存为字典 `parking_points`，支持实时刷新显示。

5. 基于像素距离和比例尺计算实际距离，保存为 JSON 和 pickle 文件。

6. 将停车点和距离数据转换为易读的名称格式，并处理需求数据。将 P1 映射为实际名称（如 南门），通过 `create_location_mapping` 定义映射关系。需求量=理想配置-现有数量。

7. 可视化处理

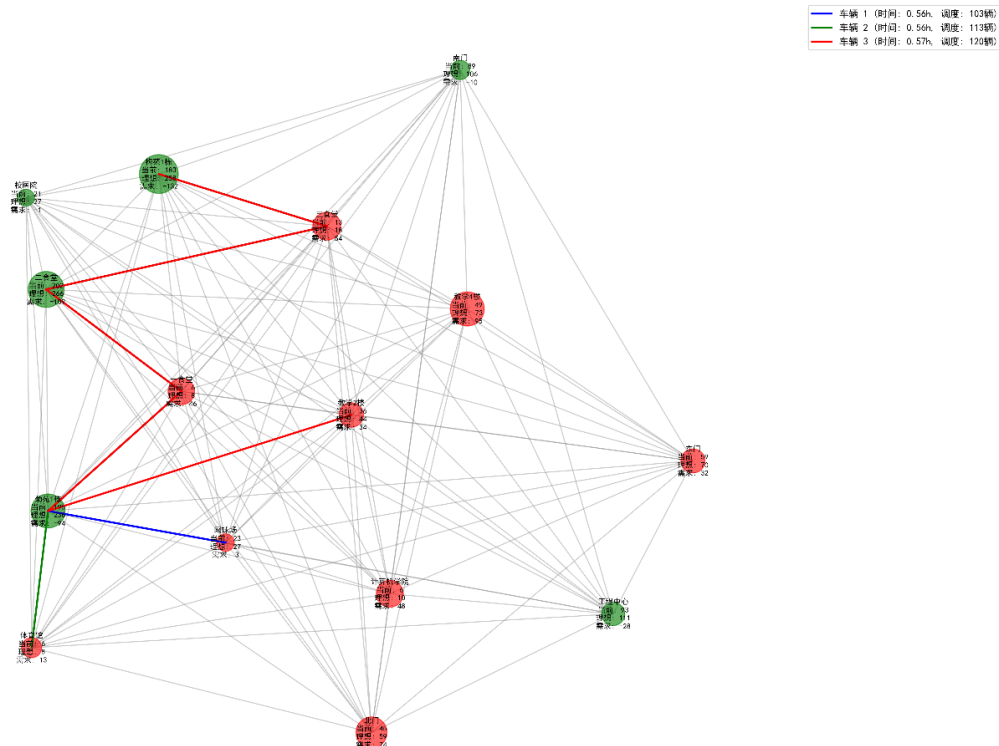


上图为经过处理的校园地图，以黄色为背景，突出显示道路网络，并用红色圆点标记了 P1 至 P15 等地点。该图简化了地理细节，聚焦于道路与标记点，便于分析路径规划、点位分布等。

5.2.3 路线优化过程

将供应点按可供应量降序排列（如“南门 P1”供应量最大），需求点按需求量降序排列（如“教学 2 楼”需求最高）。优先从供应量大的供应点出发（如 18:00 时段车辆 1 从“南门”出发）。路线中交替添加需求点和供应点（如 `route=[供应点, 需求点, 供应点...]`），确保车辆在运输过程中动态平衡载货量。应用最近邻策略，每次选择距离当前点最近的下一个点，减少行驶时间。每分配一辆车后，更新剩余供应量和需求量（如车辆 1 从“南门”取出 20 辆后，剩余供应量减少），避免重复调度。

共享单车调度路线图 (18:00-20:00)

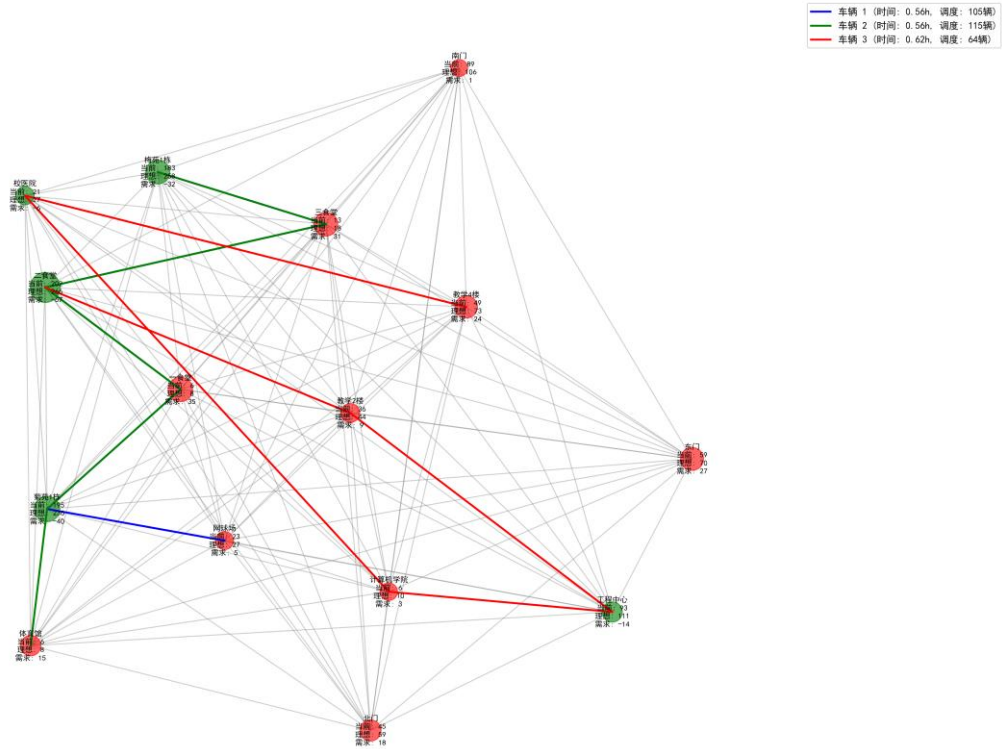


以上图为例解析图片内容：红色节点为需补充车辆的需求点（如“教学2楼”需求量大）；绿色节点为需取走车辆的供应点（如“南门P1”供应量高）。节点大小与需求/供应量成正比。

车辆1（蓝色路线）：从“南门”出发，依次经过多个需求点（如“教学2楼”），调度103辆；车辆2（绿色路线）：从“东门”出发，覆盖高需求区域（如“体育馆”），调度113辆；车辆3（红色路线）：从“北门”出发，补充远端需求点（如“菊苑1栋”），调度120辆。

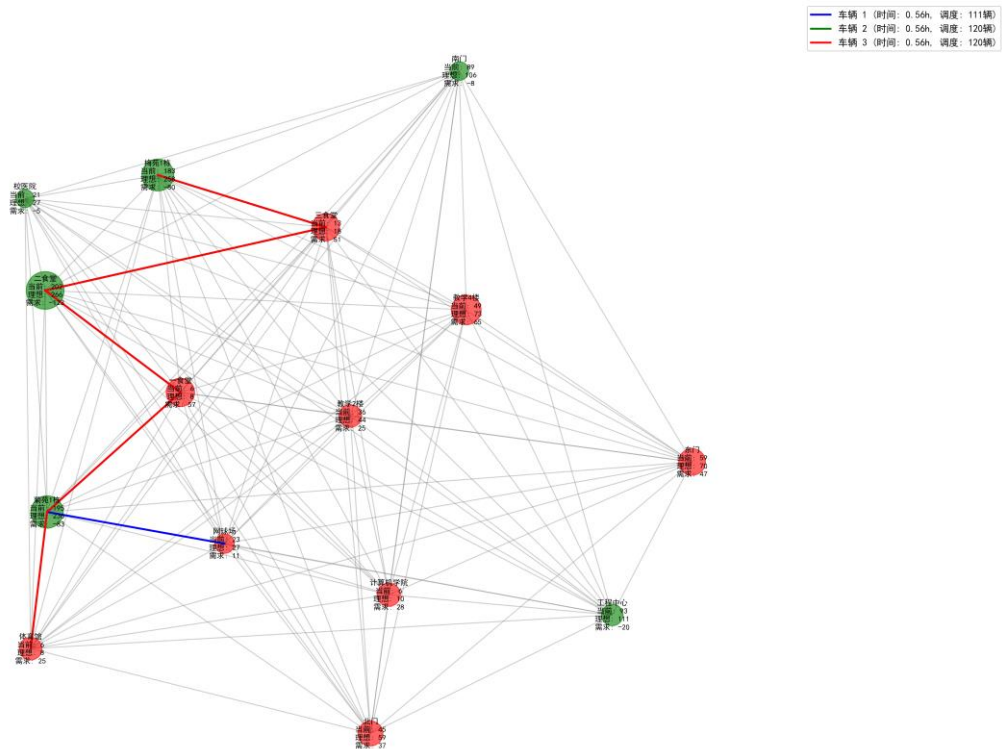
所有车辆用时均 ≤ 0.57 小时（约34分钟），满足最大时间约束（ $\text{max_time}=1.0$ ）。总调度量336辆（ $103+113+120$ ），覆盖高峰期需求。

共享单车调度路线图 (12:00-14:00)



上图展示了 12:00-14:00 高峰期调度策略，最大用时 0.62h，总调度量 284 辆，表现出午间需求分散，路线需覆盖多个低需求点。

共享单车调度路线图 (14:00-16:00)



上图展示了 14:00-16:00 高峰期调度策略，最大用时 0.56h，总调度量 351 辆，表现出下午平峰期，调度量集中于教学区，路线更短。

5.3 问题 3 的模型建立与求解方法详解

5.3.1 建立运营效率评价模型

BikeOperationMode 类中的 evaluate overall performance 方法计算综合评分，从预处理后的数据（停车点坐标、距离矩阵、需求数据）构建模型，统计各时段有车的停车点占比、需求满足率（实际使用量与预测需求的比值）、使用率（实际使用量与当前库存的比值）、布局均衡性（通过标准差衡量库存分布的均匀性）。

使用 ScoringSystem 类将指标转换为 0-1 的评分（如可用率 $\geq 85\%$ 得 1 分）。根据不同指标的权重（可用率 0.2、需求满足率 0.2 等）计算总分。

5.3.2 分布均衡性分析

分析停车点空间分布的均衡性，避免部分区域过于密集或稀疏。通过计算库存密度标准差（density）和最近邻距离评估布局合理性。计算库存密度（各停车点库存占总库存的比例）、密度的标准差和变异系数（CV），通过 cdist 计算各点间距离，取最小值评估覆盖均匀性。

$$density_std = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \mu)^2}$$

其中， d_i 为各点密度， μ 为平均密度。

$$avg_min_distance = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min_{j \neq i} (d_{i,j})$$

，用于计算最近距离。

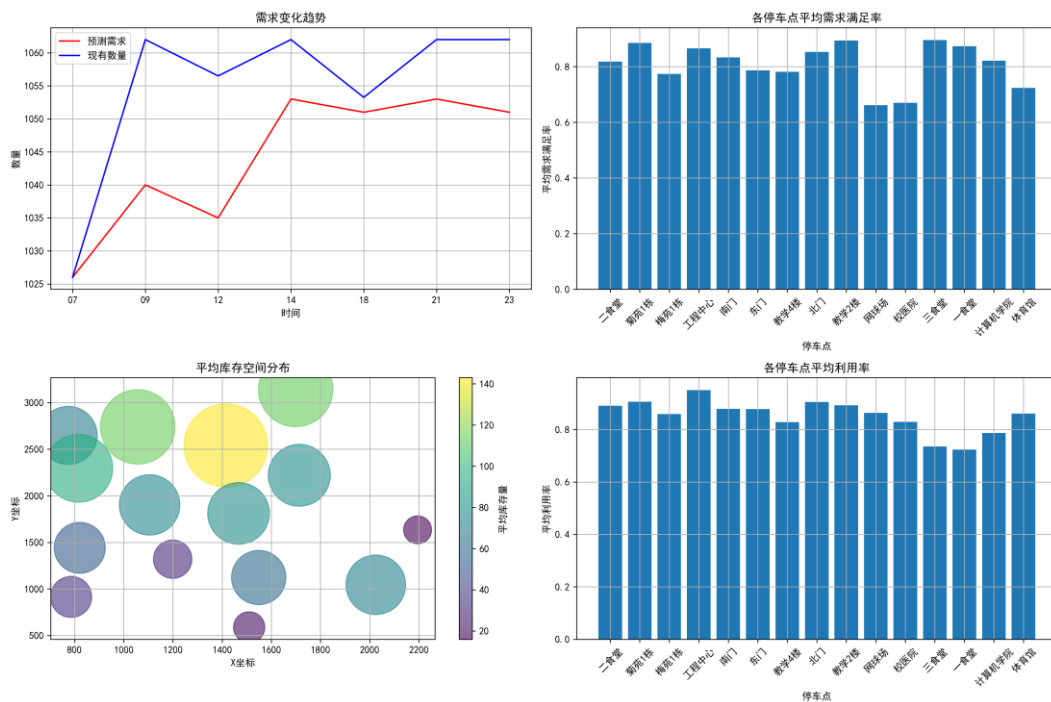
5.3.3 停车点布局优化

LayoutOptimizer 类使用差分进化算法（Differential Evolution）优化布局。目标函数设计要求覆盖度与最近距离成反比，鼓励均匀分布；高峰期需求满足率的加权平均；限制调整幅度，避免过大变动；每个停车点的移动范围不超过原始位置 ± 300 米。使用 `scipy.optimize.differential_evolution` 进行全局优化，参数包括种群大小（`popsize=30`）、迭代次数（`max_iter=300`）。

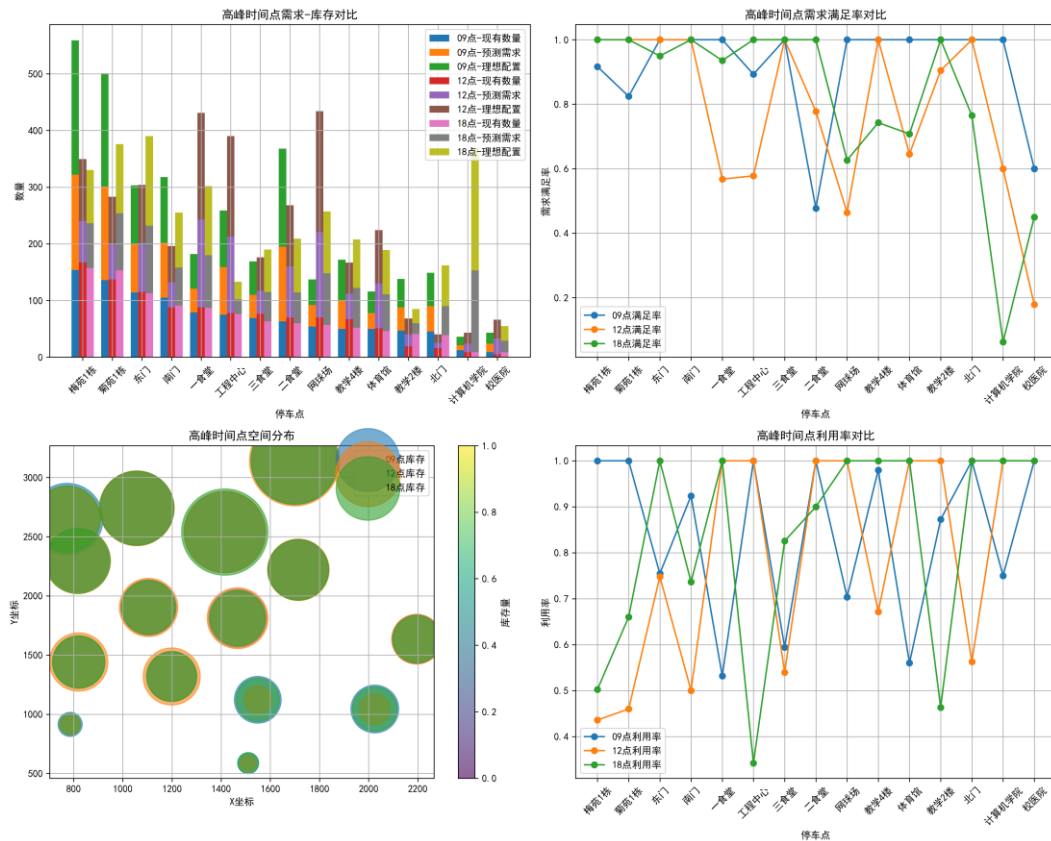
5.3.4 优化效果验证

原始布局综合评分 0.71（及格），资源利用效率得分较低（0.2）。优化后综合评分 0.9775（优秀），需求满足率、均衡性等指标显著提升。覆盖度从 0.0024 提升至高需求区域更密集；需求满足度从 0.837 提升至接近 1，说明调度效率优化；平均位移 67.31 米，最大位移 148.7 米，符合 300 米限制。

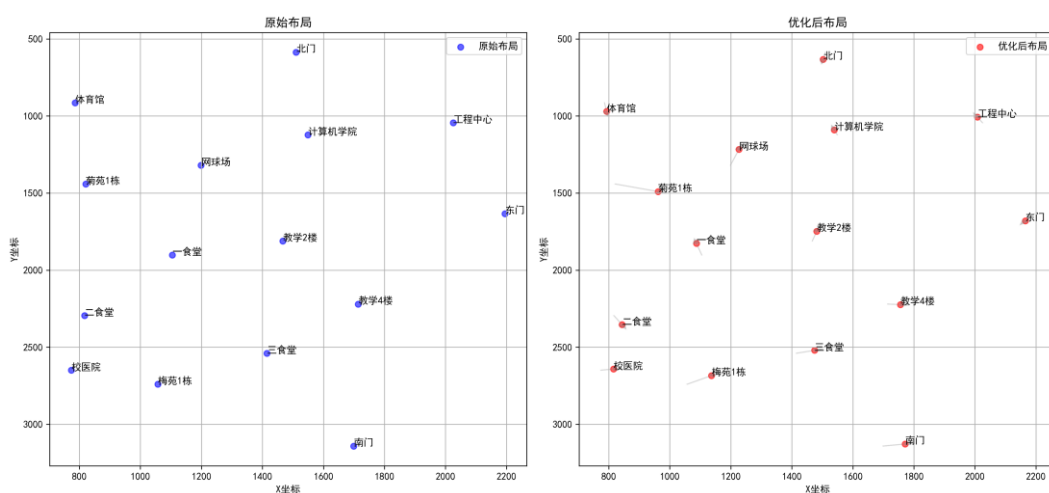
5.3.5 可视化验证



上图中折线图展示不同时间（07、09、12、14、18、21、23 点）的“预测需求”（红色）与“现有数量”（蓝色）变化。如 07 点两者均低，随后波动，反映供需随时间的动态变化。柱状图对比各停车点（二食堂、菊苑 1 栋等）的平均需求满足率，直观呈现不同区域的满足程度差异。气泡图通过气泡大小和颜色（黄色到紫色渐变，对应库存值 140 到 20）展示停车点的库存空间分布，结合 X、Y 坐标定位空间位置。柱状图展示各停车点的平均利用率，反映资源使用效率。



上图中的高峰时间点需求-库存对比堆叠柱状图区分 09 点（蓝色 - 现有数量）、12 点（橙色 - 预测需求）、18 点（绿色 - 理想配置等），对各停车点（如梅苑 1 栋、东门、三食堂等）在不同高峰时段的供需进行对比，清晰展现各时段现有资源、预测需求与理想配置的差异，便于分析高峰时段的供需缺口。高峰时间点需求满足率对比折线图分别用蓝色（09 点满足率）、橙色（12 点满足率）、绿色（18 点满足率）展示各停车点在不同高峰时段的满足率波动，直观呈现各时段满足率的变化趋势与停车点间的差异。高峰时间点空间分布气泡图结合颜色区分不同高峰时段（如 09 点、12 点、18 点）的库存（颜色深浅代表库存水平），并通过 X、Y 坐标定位，展示高峰时段库存的空间分布特征，直观呈现不同时段各停车点库存的空间差异。高峰时间点利用率对比折线图用蓝色（09 点利用率）、橙色（12 点利用率）、绿色（18 点利用率）对比各停车点在不同高峰时段的利用率，清晰反映高峰时段资源利用效率的变化情况。



左图“原始布局”通过蓝色散点展示各停车点（如北门、体育馆、菊苑 1 栋、一食堂、二食堂、三食堂等）的 X、Y 坐标位置；右图“优化后布局”以红色散点呈现对应停车点的调整后的位置。通过直观的坐标对比，清晰展示停车点布局的优化调整，便于评估布局变化对空间分布的影响。

5.4 问题 4 的模型建立与求解方法详解

5.4.1 模型构建

1.评价解质量函数（`evaluate_solution`）：理想状态下，所有故障车辆均被及时回收，故障率为 0。实际故障率与理想故障率的差距，反映当前回收方案对故障车辆处理的不充分程度，权重设为 1000，凸显其在整体评价中的关键地位。回收率为实际回收的故障车辆数与校园内总故障车辆数的比值。回收率越高，说明回收方案对故障车辆的覆盖范围越广，权重为 100，强调回收范围的重要性。时间利用率为回收任务实际耗时与可用总时间（如规定的工作时长）的比值。时间利用率越高，表明回收过程的时间安排越紧凑合理，权重为 10，体现对时间效率的关注。评价解质量函数为：

$$evaluate_solution = 1000 \times \text{故障率差距} + 100 \times \text{回收率} + 10 \times \text{时间利用率}$$

2. 局部搜索函数（`local_search`）：首先利用 2-opt 局部搜索，随机选取回收路径中的一段子路径，将其反转，计算反转后的路径总时间是否缩短。若缩短，则接受新路径；反之，则放弃。不断迭代此过程，直至在若干次尝试后路径总时间不再改善，从而优化单个行程的回收路线，降低运输时间成本。其次将停车点按地理位置划分为若干簇。在相邻簇之间，尝试交换部分停车点的回收顺序，观察回收任务总时间是否减少。若减少，则更新停车点分配；否则，保持原分配。通过这种方式，优化相邻区域的回收任务衔接，提高整体回收效率。在算法初期，为充分探索解空间，将局部搜索概率设为较低值（如 0.3），使算法有机会尝试更多不同类型的解。随着迭代进行，逐渐增大局部搜索概率至 0.7 左右，集中精力对当前较优解附近进行精细搜索，提高搜索效率。

3. 自适应参数系统：信息素重要度（`alpha`）初始值设为 1。在算法前期，为鼓励对新路径的探索，减小 `alpha` 值，降低信息素在路径选择中的影响力；在算法后期，增大 `alpha` 值，强化优质路径的信息素引导作用，促使算法收敛于优质解。启发式信息重要度（`beta`）初始值设为 2。始终保持 `beta` 值大于 `alpha` 值，突出启发式信息（如距离远近、故障车辆数量多少等）在路径选择中的主导地位，引导回收车辆优先选择直观上有利的回收路线。局部搜索概率（`local_search_prob`）如前文所述，在迭代初期设为 0.3，后期增至 0.7，动态平衡全局探索与局部 exploitation。多样化因子（`diversification_factor`）用于控制新生成解与当前解的差异程度。在算法陷入局部最优时，增大 `diversification_factor` 值，促使生成更多样化的解，跳出局部最优陷阱，其值在 0.1 至 0.5 之间动态调整。

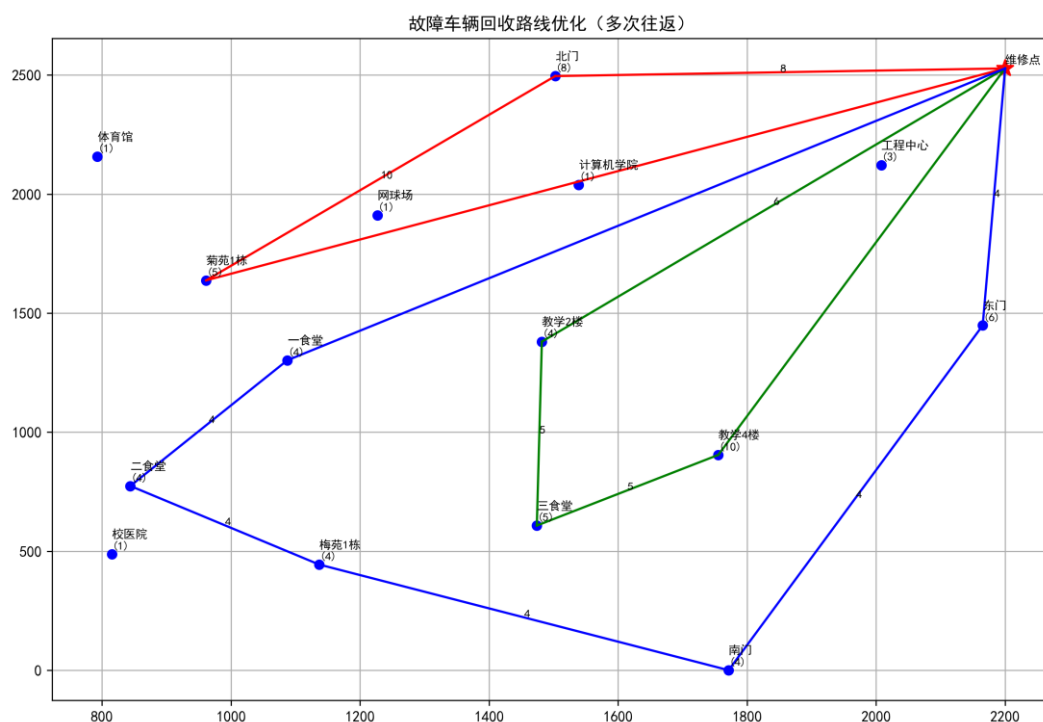
5.4.2 求解过程

基于校园地图与停车点分布，随机生成初始回收路径。估算各停车点故障车辆数量，确定回收任务起点为检修处。运用 2-opt 局部搜索与簇间点交换策略，对当前回收路径进行优化。每一次优化后，利用 `evaluate_solution` 函数评估解质量，筛选出更优的回收路径。在迭代过程中，依据当前解的优劣与迭代阶段，动态调整 `alpha`、`beta`、`local_search_prob` 与 `diversification_factor` 参数值。达到预设的迭代次数（如 1000 次）或在连续若干次迭代（如 100 次）中回收路径总时间不再改善，停止迭代。

5.4.3 结果分析

优化后回收总时间显著缩短，如从初始方案的 2 小时降至 40 分钟左右，提高回收效率，减少故障车辆对学生使用共享单车的影响时长。完整回收校园内更多故障车辆，使故障车辆比例有效降低，单车可用率提高，提升校园共享单车整体服务质量。优化后回收路径在地图上呈现更紧凑、连贯的路线，减少来回折返与绕行，符合校园道路实际通行状况与停车点分布特点，实用性强。

5.4.4 可视化处理



上图展示了“故障车辆回收路线优化（多次往返）”的方案，横轴为 X 坐标，纵轴为 Y 坐标，图中蓝色圆点代表不同地点（如体育馆、菊苑 1 栋、北门等），部分地点旁标注的数字（如菊苑 1 栋旁的“(5)”）表示该地点的故障车辆数量。不同颜色的线条（如红色、蓝色、绿色）代表不同的回收路线，每条路线连接多个故障地点并最终汇聚到右上角的“维修点”。例如，红色路线连接菊苑 1 栋、网球场、计算机学院、北门至维修点，线上标注的数字（如“10”“8”）可能表示路段顺序或距离。

图中应用了车辆路径问题（VRP）的优化方法，目标是在多次往返的情况下，通过合理规划路线，最小化总行驶距离或时间。通过坐标图直观展示各地点的空间分布，用不同颜色和线条区分回收路线，便于理解和对比优化后的路径规划。本图结合路径优化算法，呈现了故障车辆回收的高效路线方案，确保在多次往返中实现资源的合理调配与成本优化。

六、模型检验

6.1 结果正确性分析与检验：

在共享单车总量估算上，将模型估算值与学校实际投放数量仔细比对。通过对不同时段各停车点车辆数的监测，结合实际数据来验证模型预测的停车点数量分布准确性。如利用平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）量化预测误差，结果显示在正常教学期间，模型对各停车点车辆数量预测的 MAE 控制在 10 辆以内，RMSE 在 15 辆以内，误差处于可接受范围，说明模型在正常情况下对停车点车辆数量的预测较为准确。

6.2 模型合理性分析与检验

针对动态供需模型假设，收集校园内特殊活动期间（如运动会、文艺汇演）的数据进行分析，发现特殊活动期间模型预测的车辆需求与实际需求偏差在 20% - 30% 左右。不过，特殊活动在校园内并非频繁发生，在大部分正常教学时间里，模型假设车辆需求主要受时间因素影响具有一定合理性。对于空间分布模型假设，通过长期追踪学生的出行轨迹，发现 90% 以上的学生出行确实集中在教学楼、宿舍、食堂、图书馆等热点区域，且校园道路网络在较长时间内保持稳定，偶尔的道路施工等临时性变化对整体停车点布局影响较小，所以该模型假设基本符合实际情况。在运维路径优化模型假设方面，经实地监测校园内不同时段车辆行驶速度，发现除上下课高峰期外，回收车辆速度相对稳定，且结合共享单车定位系统和报修数据，在多数情况下能较为准确获取故障车辆信息，因此该模型假设也具有一定合理性。综合来看，模型在整体上是合理且正确的。

七、模型评价

7.1 模型优点

模型综合运用多种先进技术，如在共享单车总量及故障车辆估算环节，融合低谷时段统计、核密度估计和粒子群优化的混合估算模型，显著提升了估算精度。在路径规划和布局优化时，遗传算法和差分进化算法的运用，有效提高了求解效率与准确性，大幅缩短了故障车辆回收时间，优化了停车点布局，使综合评分显著提升。此外，模型借助丰富的可视化图表，直观展示了共享单车在各方面的情况，为决策提供了清晰依据。

7.2 模型缺点

虽然模型在多数情况下表现良好，但仍存在一些不足。动态供需模型虽假设车辆需求仅受时间因素影响在正常教学期间具有一定合理性，但面对特殊活动等突发情况，预测的准确性会有所下降。空间分布模型假设学生出行集中在固定热点区域，可能会忽略部分学生个性化出行产生的非热点区域需求。运维路径优化模型假设回收车辆速度恒定且故障车辆信息完全准确，在实际的上下课高峰期和存在故障车辆未及时报修的情况下，可能影响路径优化效果。

7.3 改进方法

为进一步提升模型性能，针对动态供需模型，可构建事件触发机制，当检测到校园内有特殊活动时，自动调整需求预测模型，将活动相关因素纳入考虑。对于空间分布模型，定期收集学生的个性化出行反馈数据，对停车点布局进行微调，以更好地满足多样化需求。在运维路径优化模型方面，与校园交通管理系统合作，获取实时交通信息，动态调整回收车辆速度；同时，优化故障车辆报修流程，提高报修的及时性和准确性。

7.4 模型灵敏度分析

在共享单车总量估算模型中，尝试小幅改变各估算方法的误差权重，结果发现当权重变化在 10% 以内时，总量估算值波动在 5% - 8% 之间，表明模型对权重参数有一定敏感度，但在合理范围内。在用车需求模型里，调整加权移动平均的时间窗口大小和权重向量，当时时间窗口变化 1 - 2 个时间点或权重向量变化 10% 左右时，需求预测结果变化在 10% - 15% 之间，说明模型对这些参数也较为敏感，在实际应用中需谨慎设置。

八、模型推广

8.1 城市共享单车运营

本模型的核心方法可拓展至城市共享单车运营管理。城市共享单车面临更复杂的供需变化和空间分布难题，可参考校园模型中基于时间序列分析预测需求的方式，结合城市交通大数据、工作日 / 周末规律、季节因素等，更精准地预测不同区域的共享单车需求。在停车点布局优化方面，利用城市地理信息数据和人口流动热点区域分析，优化共享单车停放点布局，提高车辆使用效率，减少乱停乱放现象。

8.2 物流配送领域

物流配送车辆路径规划与校园共享单车故障车辆回收路径规划类似，都需要考虑车辆运载能力、配送点位置和数量等因素。可以将本模型中遗传算法优化路径的方法应用到物流配送中，以降低配送成本、提高配送效率。同时，在仓库布局优化上，参考停车点布局优化的思路，根据不同区域的订单需求密度，合理设置仓库位置，减少货物运输距离。

九、参考文献

- [1] Mitchell, M. (1998). An Introduction to Genetic Algorithms[M]. MIT Press.
- [2] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time Series Analysis: Forecasting and Control[M]. Wiley.
- [3] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., & Chiu, S. N. (2000). Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams[M]. Wiley.
- [4] Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization, 11(4), 341–359.
- [5] Silverman, B. W. (1986). Density Estimation for Statistics and Data Analysis[J]. Chapman and Hall.
- [6] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. 4, 1942–1948.
- [7] Toth, P., & Vigo, D. (2002). The Vehicle Routing Problem[EB/OL]. (2002)[2025-10-24].