武汉大学期末课程作业

无人机配送路径规划问题

姓名：袁梦莹

学号：2023202210158

目录

1. 问题建模 1

1.1 问题解析 1

1.2 参数设定 1

1.3 订单优先级 2

2. 算法设计 2

2.1 订单生成和预处理 2

2.2 路径规划问题建模 3

2.3 算法步骤 3

3. 方法实现 4

3.1 Google OR-Tools 4

3.2 代码实现 4

4. 结果展示 10

5. 结果分析 14

5.1 实验结果分析 15

5.2 改进方向 15

6. 总结 16

本文主要参考了现有的带时间窗的车辆路径规划问题（VRPTW）解决方案，使用 Google OR-Tools 库结合本题目的限制条件进行适应性优化调整，最终得出无人机配送规划解决方案。下面将从问题建模、算法设计、方法实现、结果展示、总结分析这五个方面对问题进行展开分析。

1. 问题建模

1.1 问题解析

本研究旨在解决无人机的最后 10 公里配送问题，针对特定约束条件（无人机的携带物品数量、飞行距离限制、配送时间要求等）进行优化，以使得一段时间（如一天）内，所有无人机的总配送路径最短。在此模型中，考虑了几个配送中心和多个卸货点。每个卸货点都会随机生成按优先级别分类的订单（一般、较紧急、紧急）。系统每隔一段时间（t 分钟）做出决策，包括分配配送中心的无人机完成指定订单，以及为每个无人机规划适宜的配送路径。在做决策时，可以选择暂不对紧急程度较低的订单进行配送，而是将其累积到后面的配送任务中。值得注意的是，在此模型中，我们假设无人机一次最多携带 n 个物品，单次飞行距离不超过 20 公里（包括返回配送中心），无人机飞行速度为 60 公里/小时，配送中心的无人机和订单的数量均为无限。这个问题是对现实中零售物流最后一公里配送的有效模拟，解决这一问题能为零售业、物流业及相关领域提供有益的策略建议。

1.2 参数设定

j	配送中心数量，实验中设定为 5

k	卸货点数量，实验中设定为 3
t	时间离散化单位（分钟），实验中设定为 30mins
n	无人机一次最多携带的物品数量，实验中设定为 10
D_{max}	无人机一次飞行最远路程（20 公里）
v	无人机速度（60 公里/小时）
订单生成率	每个卸货点每隔 t 分钟生成的订单数量（0-m 个）

1.3 订单优先级

一般	3 小时内（180 分钟）
较紧急	1.5 小时内（90 分钟）
紧急	0.5 小时内（30 分钟）

假设所有订单生成和配送均在 100x100 的网格内进行。

距离计算使用欧几里得距离。

2. 算法设计

2.1 订单生成和预处理

每隔 t 分钟生成一次订单，对于每个订单记录：生成时间、卸货点位置、订单优先级。

2.2 路径规划问题建模

路径规划可以采用带时间窗的车辆路径问题（VRPTW）进行建模。基本思路是将无人机看作车辆，配送中心看作车辆出发和返回的地点，卸货点作为路径中的节点。

2.3 算法步骤

(1) 初始化：将所有配送中心和卸货点的位置及订单信息初始化。

(2) 生成订单：每隔 t 分钟，根据每个卸货点的订单生成率生成订单，记录订单信息，包括时间、位置和优先级。

(3) 订单分类：根据优先级对订单进行分类。

(4) 路径规划：

- 在每轮路径规划时，优先处理紧急订单。如果没有紧急订单，则处理所有订单。
- 对于每个配送中心，利用优化算法规划无人机的路径。
- 优化目标：最小化总配送路径长度，同时满足订单优先级的时间窗要求。
- 在每轮路径规划后，将已配送的订单从订单列表中移除。

(5) 路径分配：

- 选择合适的无人机数量和每个无人机的路径。
- 考虑无人机最大负载和最大飞行距离约束。

(6) 执行配送：按照规划的路径执行配送。

(7) 更新状态：更新每个订单的状态（已完成/未完成），并准备下一轮的订单生成和路径规划。

3. 方法实现

3.1 Google OR-Tools

Google OR-Tools 是一个在解决运筹学和约束满足问题方面极其强大的套件。使用 Python、Java、C#和 C++等多种编程语言可以极为便利地访问这个库。各种问题，无论是车辆路径问题、流量最大化、线性和整数问题，还是各种约束求解问题等等组合优化问题，都可以在这个库中找到对应的算法和工具来解决。OR-Tools 内含多种先进的算法和求解器，例如线性和混合整数规划求解器，约束规划求解器，最短路径算法，流量网络算法等。此外，因为 OR-Tools 提供了丰富的工具和接口来形容问题，用户可以为各种复杂的业务问题定义自己的约束和优化目标，这使得 OR-Tools 非常的灵活和可扩展。由 Google 开源并有活跃社区持续开发和优化的 OR-Tools，不仅能处理大规模问题，且经过高度优化，使得在实践中得到了验证的求解器和算法都非常高效。

3.2 代码实现

(1) 随机生成配送中心和卸货点位置

通过随机生成定位点来模拟配送中心和卸货点，然后遍历这些点，计算每个配送中心到每个卸货点的距离，并将所有计算出的距离保存至一个列表中。

```
# 生成配送中心和卸货点位置
delivery_centers = [(random.randint(0, 100), random.randint(0, 100)) for _ in range(num_delivery_centers)]
drop_points = [(random.randint(0, 100), random.randint(0, 100)) for _ in range(num_drop_points)]
for center in delivery_centers:
    for drop_point in drop_points:
        distance = calculate_distance(center, drop_point)
        distances.append(distance)
```

(2) generate_orders

generate_orders 函数的主要作用是每次被调用时根据当前时间生成新的订单列表。每个订单包含了卸货点的位置信息、订单的优先级以及订单创建的时间。

```
# 订单生成函数
def generate_orders(current_time):
    new_orders = []
    for drop_point in drop_points:
        num_orders = random.randint(0, 3)
        for _ in range(num_orders):
            priority = random.choice(['一般', '较紧急', '紧急'])
            new_orders.append({
                'location': drop_point,
                'priority': priority,
                'time_created': current_time,
            })
    return new_orders
```

函数接收一个参数 current_time，表示当前的时间点。对于每个预定义的卸货点，函数随机生成 0 到 3 个新订单，每个订单随机分配一个优先级（“一般”，“较紧急”或“紧急”）并记录其创建时间。最终，这个函数返回含有所有新生成订单的列表。

(3) plan_paths

plan_paths 函数是主要函数，它的作用是根据订单信息进行路径规划，确保每个配送中心的无人机能够高效地完成所有订单的配送。具体来说，这个函数利用了 Google OR-Tools 库中的路由求解器来确定最佳的配送路径。

定义变量和索引

```
num_locations = len(orders) + num_delivery_centers
starts = [i for i in range(num_delivery_centers)]
ends = [i for i in range(num_delivery_centers)]
```

- num_locations：总的位置数，包括配送中心和卸货点的总数。

- starts 和 ends：定义每个车辆的起始和结束位置（在这个例子中，起始和结束位置都是配送中心）。

创建路由管理器和路由模型

```
manager = pywrapcp.RoutingIndexManager(num_locations, num_delivery_centers, starts, ends)

routing = pywrapcp.RoutingModel(manager)
```

创建路由索引管理器，用于管理位置索引和车辆的起始/结束位置。创建路由模型，用于定义和求解车辆路径问题。

定义距离回调函数

```
# 定义距离函数
def distance_callback(from_index, to_index):
    from_node = manager.IndexToNode(from_index)
    to_node = manager.IndexToNode(to_index)
    if from_node < num_delivery_centers:
        from_loc = delivery_centers[from_node]
    else:
        from_loc = orders[from_node - num_delivery_centers]['location']
    if to_node < num_delivery_centers:
        to_loc = delivery_centers[to_node]
    else:
        to_loc = orders[to_node - num_delivery_centers]['location']
    return calculate_distance(from_loc, to_loc)
```

- distance_callback 函数用于计算两个位置之间的距离。该函数通过索引将位置映射为实际坐标，然后使用 calculate_distance 函数计算欧几里得距离。
- transit_callback_index = routing.RegisterTransitCallback(distance_callback)：注册距离回调函数，使得求解器能够使用这个函数来计算路径上的距离。

设置弧成本评估器

```
transit_callback_index = routing.RegisterTransitCallback(distance_callback)
routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(transit_callback_index)
```

为所有车辆设置弧成本评估器，使用前面定义的距离回调函数计算路径成本。

添加容量约束

```python
# 添加容量约束
def demand_callback(from_index):
    from_node = manager.IndexToNode(from_index)
    if from_node < num_delivery_centers:
        return 0
    return 1

demand_callback_index = routing.RegisterUnaryTransitCallback(demand_callback)
routing.AddDimensionWithVehicleCapacity(
    demand_callback_index,
    0,  # null capacity slack
    [max_carry_items] * num_delivery_centers,  # vehicle maximum capacities
    True,  # start cumul to zero
    'Capacity')
```

- demand_callback 函数返回每个位置的需求（在这个例子中，配送中心的需求为 0，卸货点的需求为 1 ）。
- demand_callback_index routing.RegisterUnaryTransitCallback(demand_callback)：注册需求回调函数。
- routing.AddDimensionWithVehicleCapacity(...)：添加容量约束，确保每辆车（无人机）携带的订单数量不超过最大容量 max_carry_items。

添加距离约束

```python
# 添加距离约束
routing.AddDimension(
    transit_callback_index,
    0,  # no slack
    max_distance,
    True,
    'Distance')
distance_dimension = routing.GetDimensionOrDie('Distance')
distance_dimension.SetGlobalSpanCostCoefficient(100)
```

- routing.AddDimension(...)：添加距离约束，确保每辆车的行驶距离不超过 max_distance。
- distance_dimension.SetGlobalSpanCostCoefficient(100)：设置全局跨度成本系数，有助于优化路径。

设置搜索参数并解决问题

```
search_parameters = pywrapcp.DefaultRoutingSearchParameters()
search_parameters.first_solution_strategy = routing_enums_pb2.FirstSolutionStrategy.PATH_CHEAPEST_ARC
search_parameters.time_limit.seconds = 30  # 增加时间限制，提供更多求解时间

solution = routing.SolveWithParameters(search_parameters)
```

- search_parameters = pywrapcp.DefaultRoutingSearchParameters()：获取默认的路由搜索参数。
- search_parameters.first_solution_strategy = routing_enums_pb2.FirstSolutionStrategy.PATH_CHEAPEST_ARC：设置初始解决策略。
- search_parameters.time_limit.seconds = 30：设置搜索时间限制为 30 秒。
- solution = routing.SolveWithParameters(search_parameters)：使用设置的搜索参数求解路径规划问题。

提取和返回路径

```
# 输出路径
if solution:
    routes = []
    for vehicle_id in range(num_delivery_centers):
        index = routing.Start(vehicle_id)
        route = []
        while not routing.IsEnd(index):
            node_index = manager.IndexToNode(index)
            if node_index < num_delivery_centers:
                route.append(delivery_centers[node_index])
            else:
                route.append(orders[node_index - num_delivery_centers]['location'])
            index = solution.Value(routing.NextVar(index))
        routes.append(route)
    return routes
else:
    print('No solution found!')
    return None
```

- 如果找到解决方案，函数会遍历每辆车的路径，提取实际坐标，并将其存储在 routes 列表中。
- 如果没有找到解决方案，函数会输出“No solution found!”。

(4) 可视化

这个函数主要用于可视化无人机的配送路径，通过绘制配送路线、配送中心和卸货点的位置，使数据直观化。

```python
# 可视化路径
def plot_routes(routes):
    colors = ['r', 'g', 'b']
    for i, route in enumerate(routes):
        x_coords = [loc[0] for loc in route]
        y_coords = [loc[1] for loc in route]
        plt.plot(x_coords, y_coords, marker='o', color=colors[i % len(colors)], label=f'Drone {i+1}')
    for center in delivery_centers:
        plt.scatter(center[0], center[1], c='black', marker='x', s=100)
    for drop_point in drop_points:
        plt.scatter(drop_point[0], drop_point[1], c='blue', marker='o', s=50)
    plt.legend()
    plt.xlabel('X Coordinate')
    plt.ylabel('Y Coordinate')
    plt.title('Drone Delivery Routes')
    plt.show()
```

(5) 主循环

在主循环中通过时间片模拟一天中的无人机配送过程，每 30 分钟：

- 检查当前时间，生成新订单，调用 generate_orders 函数；
- 筛选紧急订单来优先处理；
- 调用路径规划函数生成路线并可视化；
- 移除已处理的紧急订单。

```python
# 主循环
current_time = 0
while current_time < 24 * 60:  # 模拟一天的时间
    print(f'当前时间: {current_time} 分钟')
    new_orders = generate_orders(current_time)
    orders.extend(new_orders)
    print(f'新生成订单: {new_orders}')

    # 处理紧急订单
    urgent_orders = [order for order in orders if order['priority'] in ['较紧急', '紧急']]
    if not urgent_orders:
        urgent_orders = orders  # 如果没有紧急订单，则处理所有订单

    routes = plan_paths(urgent_orders)
    if routes:
        print(f'路径: {routes}')
        plot_routes(routes)

        # 移除已配送的订单
        orders = [order for order in orders if order not in urgent_orders]

    current_time += time_interval
```

这个流程能确保有限资源(无人机)优先处理紧急需求 ,提高订单处理效率。

4. 结果展示

生成的配送中心和卸货点的位置，这里设置 5 个配送中心，3 个卸货点。

```
配送中心位置: [(48, 59), (23, 75), (90, 90), (29, 27), (7, 3)]
卸货点位置: [(66, 47), (14, 47), (2, 55)]
```

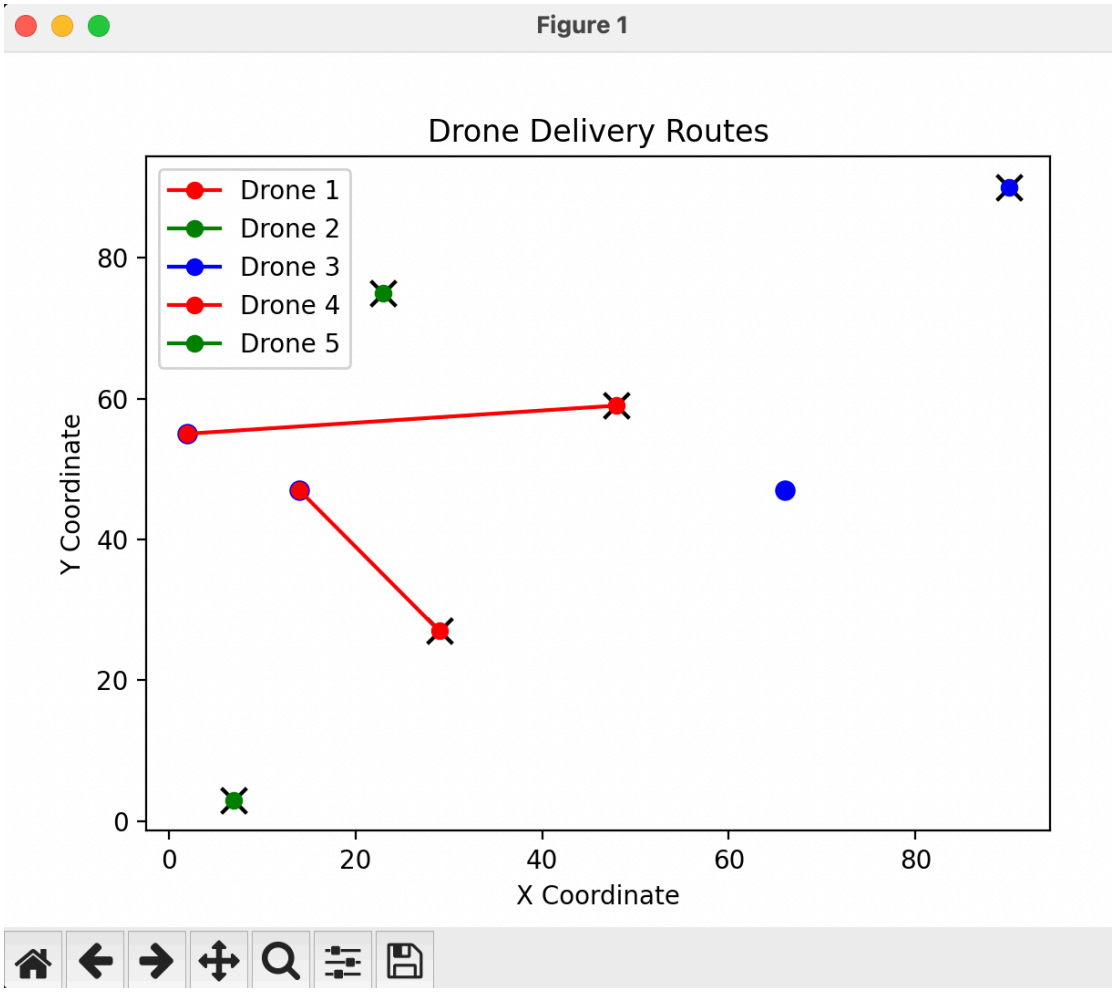
订单生成

```
当前时间: 0 分钟
新生成订单: [{'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 0}, {'location': (2, 55), 'prior
ity': '较紧急', 'time_created': 0}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 0}]
```

解析出的路径

```
当前时间: 0 分钟
新生成订单: [{'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 0}, {'location': (2, 55), 'prior
ity': '较紧急', 'time_created': 0}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 0}]
路径: [[(48, 59), (2, 55), (2, 55)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27), (14, 47)], [(7, 3)]]
```

路径可视化



上图中叉号代表配送中心，圆点代表卸货点，从卸货点产生订单，无人机从配送中心出发，完成卸货点产生的订单。

接下来简要展示这一天内产生的订单和无人机的路径

```
当前时间：30 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 30}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急',
'time_created': 30}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 30}, {'location': (14, 47), 'priority':
'紧急', 'time_created': 30}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 30}, {'location': (2, 55), 'pri
ority': '较紧急', 'time_created': 30}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (14, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：60 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 60}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急',
 'time_created': 60}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 60}, {'location': (2, 55), 'priority': '
紧急', 'time_created': 60}]
路径：[[(48, 59), (2, 55), (2, 55)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：90 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 90}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急'
, 'time_created': 90}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：120 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 120}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急
', 'time_created': 120}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 120}, {'location': (2, 55), 'priori
ty': '较紧急', 'time_created': 120}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 120}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (14, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：150 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 150}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般',
 'time_created': 150}]
路径：[[(48, 59), (14, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：180 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 180}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急
', 'time_created': 180}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 180}, {'location': (2, 55), 'prior
ity': '紧急', 'time_created': 180}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 180}, {'location': (2, 55)
, 'priority': '一般', 'time_created': 180}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：210 分钟
```

```
当前时间：210 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 210}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 210}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：240 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 240}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 240}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 240}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 240}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 240}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：270 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 270}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 270}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 270}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 270}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：300 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 300}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 300}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 300}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 300}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 300}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 300}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：330 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 330}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 330}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
```

```
当前时间：360 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 360}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (14, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：390 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 390}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 390}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 390}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 390}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 390}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：420 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 420}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 420}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 420}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 420}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 420}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 420}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (14, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：450 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 450}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 450}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 450}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 450}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 450}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 450}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：480 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 480}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 480}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 480}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 480}]
路径：[[(48, 59), (14, 47), (14, 47)], [(23, 75), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
```

```
当前时间：510 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 510}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 510}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 510}]
路径：[[(48, 59), (2, 55), (2, 55)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：540 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 540}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 540}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 540}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 540}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 540}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 540}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 540}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 540}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 540}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：570 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 570}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 570}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 570}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：600 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 600}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 600}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：630 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 630}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 630}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 630}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 630}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 630}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90), (66, 47), (66, 47)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
```

```
当前时间：660 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 660}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急',
 'time_created': 660}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 660}, {'location': (2, 55), 'priority'
: '紧急', 'time_created': 660}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 660}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (14, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：690 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 690}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般',
'time_created': 690}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 690}, {'location': (2, 55), 'priority':
'一般', 'time_created': 690}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(29, 27)], [(7, 3)]
]
当前时间：720 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 720}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧
急', 'time_created': 720}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 720}, {'location': (2, 55), 'prior
ity': '紧急', 'time_created': 720}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：750 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 750}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般',
 'time_created': 750}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 750}]
路径：[[(48, 59), (14, 47), (14, 47), (14, 47)], [(23, 75), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：780 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 780}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧
急', 'time_created': 780}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 780}, {'location': (14, 47), 'prio
rity': '一般', 'time_created': 780}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 780}, {'location': (2,
55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 780}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 780}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
```

```
当前时间：810 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 810}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急',
'time_created': 810}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 810}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：840 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 840}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急',
 'time_created': 840}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 840}, {'location': (14, 47), 'priority
': '一般', 'time_created': 840}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 840}, {'location': (2, 55)
, 'priority': '紧急', 'time_created': 840}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 840}, {'location':
 (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 840}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：870 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 870}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急
', 'time_created': 870}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 870}, {'location': (14, 47), 'priori
ty': '紧急', 'time_created': 870}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 870}, {'location': (2, 55)
, 'priority': '较紧急', 'time_created': 870}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 870}, {'location
': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 870}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27), (2, 55), (2, 55), (14, 47), (14, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：900 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 900}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般
', 'time_created': 900}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 900}, {'location': (14, 47), 'priori
ty': '紧急', 'time_created': 900}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 900}, {'location': (14,
47), 'priority': '紧急', 'time_created': 900}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：930 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 930}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急
', 'time_created': 930}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 930}, {'location': (2, 55), 'prior
ity': '紧急', 'time_created': 930}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：960 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 960}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般',
 'time_created': 960}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 960}, {'location': (2, 55), 'priority':
 '一般', 'time_created': 960}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 960}]
路径：[[(48, 59), (2, 55), (2, 55)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：990 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 990}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧
急', 'time_created': 990}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 990}, {'location': (14, 47), 'pr
iority': '一般', 'time_created': 990}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 990}, {'location': (2,
55), 'priority': '一般', 'time_created': 990}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1020 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1020}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急'
, 'time_created': 1020}]
路径：[[(48, 59), (14, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1050 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1050}, {'location': (14, 47), 'priority': '一
般', 'time_created': 1050}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1050}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
```

```
当前时间：1080 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1080}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1080}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1080}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1080}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1080}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1080}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (66, 47), (66, 47)], [(7, 3)]]
当前时间：1110 分钟
新生成订单：[{'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1110}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1110}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1110}]
路径：[[(48, 59), (14, 47), (14, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1140 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1140}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1140}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1140}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1140}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1170 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1170}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1170}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1170}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1170}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1170}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 1170}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1170}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1200 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1200}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1200}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1200}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1200}, {'location': (14, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1200}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 1200}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1200}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1200}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (14, 47), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1230 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1230}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(7, 3), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (14, 47), (14, 47)]]
当前时间：1260 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1260}, {'location': (14, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1260}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1260}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 1260}]
路径：[[(48, 59), (14, 47)], [(23, 75)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1290 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1290}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1290}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1290}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1290}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1290}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1290}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (14, 47), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(7, 3)]]
```

```
当前时间：1320 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1320}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1320}, {'location': (14, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1320}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1320}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 1320}]
路径：[[(48, 59), (66, 47), (66, 47)], [(23, 75), (14, 47), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1350 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1350}, {'location': (66, 47), 'priority': '一般', 'time_created': 1350}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1350}]
路径：[[(48, 59), (66, 47)], [(23, 75), (2, 55)], [(90, 90)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1380 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1380}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1380}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1380}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1380}, {'location': (2, 55), 'priority': '紧急', 'time_created': 1380}, {'location': (2, 55), 'priority': '一般', 'time_created': 1380}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
当前时间：1410 分钟
新生成订单：[{'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1410}, {'location': (66, 47), 'priority': '紧急', 'time_created': 1410}, {'location': (66, 47), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1410}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1410}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1410}, {'location': (2, 55), 'priority': '较紧急', 'time_created': 1410}]
路径：[[(48, 59)], [(23, 75), (2, 55), (2, 55), (2, 55)], [(90, 90), (66, 47), (66, 47), (66, 47)], [(29, 27)], [(7, 3)]]
```

5. 结果分析

本实验实现了一个无人机配送系统的模拟，包括初始化参数设置、生成配送中心和卸货点位置、订单生成、路径规划和可视化路径。通过对配送中心和卸货点之间的距离分布进行统计并可视化、生成配送订单、使用 Google OR-Tools 库

进行路径规划，并最终以图形化方式展示无人机的配送路径，实验全面模拟了从订单生成到配送完成的整个流程。

5.1 实验结果分析

首先从这一天的运行结果可以看出，本实验提出的无人机规划策略可以很好地完成目前的订单流，算法具有可行性。

通过对运行时输出结果的分析，可以识别出一些规律和潜在的问题：

(1) 无人机路径中经常会有重复的访问点，例如一条路径中多次出现相同的地点。这表明算法在处理同一时段内生成的多个订单时，可能没有充分优化路径。

(2) 路径中 的某些无人机几乎没有变化，例如在多个时段内，$(90, 90)$，$(29, 27)$，$(7, 3)$这三个未发生过变化的点，显示出未能充分利用可用的配送资源。

5.2 改进方向

- 参数可配置性增强：当前的参数如无人机速度、配送中心数量等均为硬编码，可以考虑通过命令行参数、配置文件或用户界面等方式动态输入，以提高程序的灵活性和用户体验。
- 距离计算优化：现有代码中使用的是欧几里得距离计算方式，这在真实世界中可能并不准确（考虑到建筑物、禁飞区等），可以考虑引入更实际的地形和障碍物信息来计算路径或使用地图 API。

- 订单优先级处理机制改进：对于紧急订单的处理，当前是简单地将其分为紧急和非紧急两类进行处理。更细致的优先级划分和灵活的调度策略能更好地满足不同紧急程度订单的需求。
- 路径规划算法的多样性和优化：目前采用的是 Google OR-Tools 默认的路径规划方法，可以探索更多解决方案如遗传算法、蚁群算法等，以寻求更优的路径规划策略。
- 效率和扩展性考虑：考虑到实际应用中可能需要处理的订单数量很大，代码的效率和扩展性尤为重要。优化数据结构、并行处理技术或者使用更高效的算法都是潜在的改进方向。
- 界面与交互：为了提高用户体验，可以开发图形用户界面(GUI)，使用户能够更方便地输入参数、查看模拟结果和进行交互操作。

通过对上述方向的逐步改进，在现有算法的基础上提高无人机配送系统的效率，降低路径规划中的冗余和资源浪费，无人机配送系统的模拟更加精准、高效，能够更好地面对实际应用场景的挑战。

6. 总结

本报告综合分析了无人机配送系统的模拟结果，揭示了系统在订单生成、路径规划、以及处理优先级方面的关键特征和存在的问题。通过精细审视模拟数据，识别出路线重复、资源利用不均和处理优先级订单的策略等关键问题，并提出了一系列改进方向，包括优化路径规划算法、实现负载均衡、考虑更多实际因素、引入机器学习辅助决策以及提升系统的可配置性和扩展性。这些改进措施旨在提高无人机配送系统的效率和响应能力，减少资源浪费，并确保在现实场景中的有

效应用。通过不断优化和调整，无人机配送系统有望实现更加合理的订单处理和路径规划，最终达到高效、均衡且智能的配送服务。