

# 数据结构 Project 中期文档

## O、运行示例

```
PS D:\Jimmy\_data_structure\PJ> .\pathfinder.exe --test_path
D:\Jimmy\_data_structure\PJ\Test_Cases\test_cases\shanghai_test_cases\case1_simple\
Request: Find path from "上海世纪公园" to "复旦大学（邯郸校区）".

=====
Processing map:
D:\Jimmy\_data_structure\PJ\Test_Cases\test_cases\shanghai_test_cases\case1_simple\map_1200.csv
=====
Path found! Total estimated time: 496.8 seconds.
The shortest path is:
上海世纪公园 --> 五角场 --> 复旦大学（邯郸校区）
```

```
PS D:\Jimmy\_data_structure\PJ> .\pathfinder.exe --test_path
D:\Jimmy\_data_structure\PJ\Test_Cases\test_cases\shanghai_test_cases\case2_medium
Request: Find path from "上海科技馆" to "上海博物馆".

=====
Processing map:
D:\Jimmy\_data_structure\PJ\Test_Cases\test_cases\shanghai_test_cases\case2_medium\map_0800.csv
=====
Error: Start node '上海科技馆' not found in graph.
No path found.

=====
Processing map:
D:\Jimmy\_data_structure\PJ\Test_Cases\test_cases\shanghai_test_cases\case2_medium\map_1400.csv
=====
No path found.
```

## 一、最短路径算法总结

### 1. Dijkstra 算法

**核心思想：**贪心策略，每次选择当前距离起点最近的未访问节点进行扩展，通过松弛操作逐步确定所有节点的最短路径。

**适用场景：**

- 单源最短路径问题

- 边权重为非负数的图
- 静态图

**时间复杂度：**

- 使用优先队列（二叉堆）： $O((V + E) \log V)$
- 使用斐波那契堆： $O(E + V \log V)$

**空间复杂度：** $O(V)$ ，需要存储距离数组、前驱数组和优先队列

## 2. A\* 算法

**核心思想：**启发式搜索，在 Dijkstra 基础上引入启发函数  $h(n)$ ，优先扩展  $f(n) = g(n) + h(n)$  最小的节点。

**适用场景：**

- 单源单目标最短路径
- 有明确目标点的场景（如游戏、地图导航）
- 启发函数设计良好时效率高

**时间复杂度：** $O(E)$ （最优情况）， $O(b^d)$ （最坏情况， $b$  为分支因子， $d$  为深度）

**空间复杂度：** $O(V)$

## 3. BFS（广度优先搜索）

**核心思想：**按层次遍历。

**适用场景：**

- 无权图的最短路径
- 所有边权重相等的图

**时间复杂度：** $O(V + E)$

**空间复杂度：** $O(V)$

## 二、Dijkstra 算法最优性分析

在理想的静态路径规划中，边权重非负，Dijkstra 算法总能保证找到最优路径。

### 最优性证明

起点到自身的最短距离为 0，显然是最优的。

假设算法在第  $k$  步时，已经确定的  $k$  个节点的最短路径都是最优的。在第  $k+1$  步，算法选择距离起点最近的未访问节点  $u$ （设其距离为  $d[u]$ ）。

假设存在一条从起点到  $u$  的更短路径  $P$ ，其长度为  $d' < d[u]$ 。路径  $P$  必然经过某个已访问节点到未访问节点的边界。设这个边界点为  $x$ （已访问） $\rightarrow y$ （未访问）。由于边权非负，从起点到  $y$  的距离  $\geq$  从起点到  $x$  的距离。又因为  $x$  已被访问，说明  $d[x] \leq d[u]$ ，因此  $d[y] \geq d[x] \geq d[u]$ ，这与假设的  $d' < d[u]$  矛盾。

因此，Dijkstra 算法每次确定的最短路径都是最优的。

## 三、稀疏图与稠密图的表示选择

稀疏图适合用邻接表表示，稠密图适合用邻接矩阵表示。

在本次 project 中，邻接表是更合适的选择。首先，城市道路网是典型的稀疏图。其次，Dijkstra 算法在稀疏图上效率更高。而且节点名称是字符串，使用 `unordered_map<string, ...>` 可以直接用地名索引，而邻接矩阵需要额外维护字符串到索引的映射。

## 四、Dijkstra 算法的路径回溯机制

### 路径回溯的原理

Dijkstra 算法在计算最短距离的同时，需要记录路径信息，以便在算法结束后还原完整路径。

### 数据结构

```
// 存储从起点到每个节点的最短距离
std::unordered_map<std::string, double> distances;

// 存储最短路径树中每个节点的前驱节点
std::unordered_map<std::string, std::string> predecessors;
```

### 回溯步骤

#### 1. 前向计算阶段（Dijkstra 主循环）

在松弛操作中记录前驱节点。每当找到更短路径时，更新 `predecessors[neighbor] = current_node`，表示“到达 `neighbor` 的最短路径的上一跳是 `current_node`”。

```
for (const Edge &edge : adj_list.at(current_node)) {
    std::string neighbor = edge.destination;
    double new_dist = current_dist + edge.weight;

    if (new_dist < distances[neighbor]) {
        distances[neighbor] = new_dist;
        predecessors[neighbor] = current_node; // 记录前驱
        pq.push({new_dist, neighbor});
    }
}
```

## 2. 后向回溯阶段

从终点开始，沿着 `predecessors` 逆向追溯到起点。

```
std::vector<std::string> path;
std::string current = end;

while (predecessors.count(current)) {
    path.push_back(current);
    current = predecessors[current]; // 跳到前驱节点
}

path.push_back(start); // 最后加入起点
std::reverse(path.begin(), path.end()); // 翻转得到正向路径
```

## 可视化路径的方法

### 方法 1：文本输出（当前实现）

```
A --> B --> C --> D
```

### 方法 2：图形化可视化

可以使用一些python的库来绘图，例如matplotlib。

## 五、系统改进讨论

当前系统的局限性包括但不限于：

### 1. 缺乏实时性

目前系统读取静态 CSV 文件，模拟不同时间点的路况，这导致无法处理突发事件（例如事故、施工、交通管制等）。为此，可以考虑接入实时交通数据 API，并实现增量式路径更新。

### 2. 拥堵模型过于简化

目前的 BPR 函数只考虑当前道路的车辆数，未考虑上下游道路。可以考虑使用机器学习预测路况。步骤如下：

- 收集历史数据（时间、星期、天气、节假日 → 车流量）
- 训练 LSTM/GRU 模型预测未来路况
- 将预测值集成到权重计算中

### 3. 算法效率有待提升

标准 Dijkstra 算法对于大规模图的效率较低，可以考虑使用A\*算法和双向Dijkstra算法进行优化。

### 4. 缺少多路径规划

现在只能输出一条最优路径（时间最短）。可以考虑按照距离优先、时间优先、综合推荐（综合距离、时间等因素）等维度搜索最短路径，然后将重复的去掉，最终输出结果。

### 5. 缺少路径缓存机制

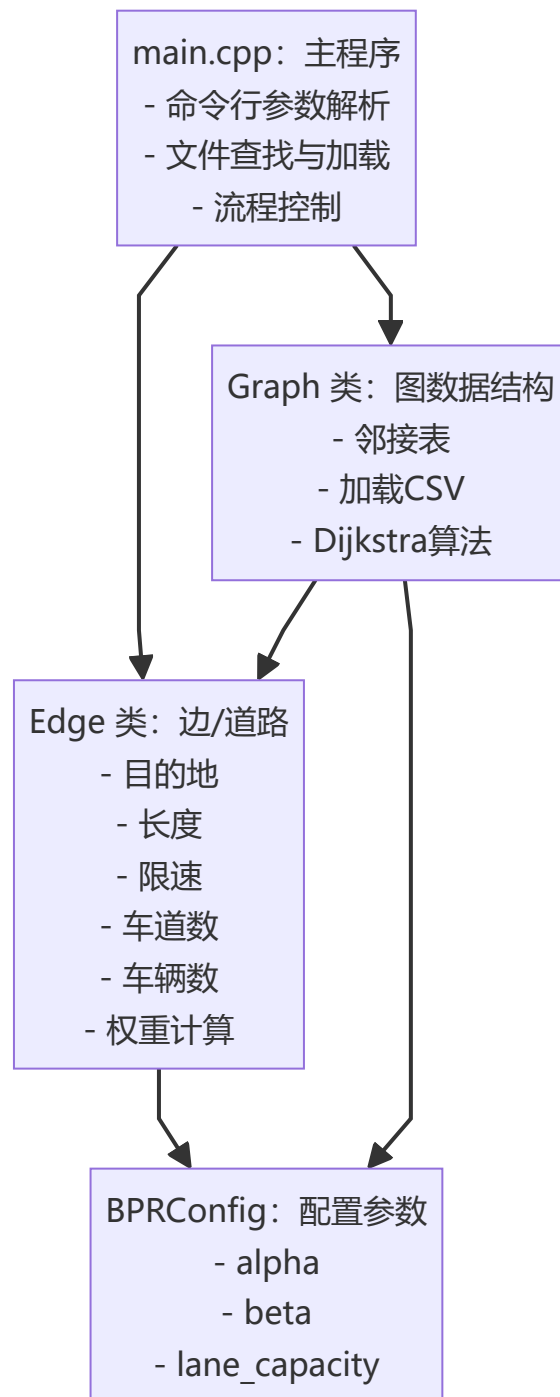
目前每次查询都需要重新计算。可以使用LRU 缓存存储最近 N 次查询的结果。以后查询时，如果起点和终点相同，就直接返回缓存结果。此外，路况更新后需要清空缓存。

## 六、项目架构介绍

---

### 6.1 整体架构设计

本项目采用**模块化、面向对象**的设计思想，将系统划分为以下核心模块：



## 6.2 模块详细设计

### Edge 类 (边/道路)

表示图中的一条边（道路），封装道路属性和权重计算逻辑。

```

std::string destination;    // 目标节点
double length;             // 道路长度（米）
double speed_limit;        // 限速（km/h）
int lanes;                 // 车道数
int current_vehicles;      // 当前车辆数
double weight;             // 边的权重（通行时间，秒）

// 使用 BPR 函数计算权重
//  $T = T_0 \times [1 + \alpha \times (V/C)^\beta]$ 
double calculate_weight() const;

```

## Graph 类 (图)

管理整个路网图，提供加载数据和路径查找功能。

```

std::unordered_map<std::string, std::vector<Edge>> adj_list;
// 邻接表：节点名 → 出边列表

```

核心方法：

1. `bool from_csv(const std::string &filename)`
  - 从 CSV 文件加载地图数据
  - 动态解析表头，兼容不同列顺序（有些.csv没有“道路类型”这一项）
  - 异常处理：无效数据跳过并警告
  - 支持双向道路自动添加反向边
2. `std::vector<std::string> find_shortest_path(const std::string &start, const std::string &end)`
  - 实现 Dijkstra 算法
  - 使用优先队列优化
  - 返回路径节点列表

## BPRConfig 类 (配置)

集中管理 BPR 函数的全局参数，便于调整。

```

double BPRConfig::alpha = 0.15;    // 拥堵敏感系数，默认 0.15
double BPRConfig::beta = 4.0;      // 拥堵指数，默认 4.0
double BPRConfig::lane_capacity = 1800.0; // 每车道容量，默认 1800 辆/小时

```

## main.cpp (主程序)

职责：命令行交互、文件管理、流程控制。

核心函数：

1. `trim(const std::string &str)`：去除字符串首尾空白

2. `find_test_files(...)`: 扫描目录, 查找 demand 文件和 map 文件
3. `read_demand(...)`: 解析 demand.txt, 提取起点和终点
4. `print_path(...)`: 格式化输出路径
5. `process_map(...)`: 处理单个地图文件, 调用 Dijkstra 并输出结果
6. `main(...)`: 主流程控制

## 6.3 可能遇到的困难与挑战

### 挑战 1: 中文编码问题

Windows 终端默认 GBK 编码, UTF-8 文件读取会乱码。因此, 在程序开头设置控制台为 UTF-8 (`chcp 65001`)

### 挑战 2: CSV 数据鲁棒性

CSV 文件可能有格式错误、缺失数据等问题 (虽然给的文件里没有, 但是这些异常情况是需要考虑的)。

解决方案:

- 动态解析表头, 不依赖固定列顺序
- Try-catch 捕获数值转换异常
- 处理 `\r` 字符
- 跳过无效行并警告

### 挑战 3: 节点名称匹配失败

节点名称可能有多余空格, 导致查找失败。因此, 实现 `trim()` 函数去除首尾空白, 并在读取节点名后立即 trim。

### 挑战 4: 参数调优

BPR 函数的  $\alpha$ 、 $\beta$  参数如何选择最合理? 目前使用经典推荐值 ( $\alpha=0.15$ ,  $\beta=4$ ), 未来可用真实数据训练拟合。

## 七、项目进度总结与规划

### 7.1 当前完成情况

#### 1. 核心数据结构设计

- ✓ Edge 类设计与实现
- ✓ Graph 类设计与实现
- ✓ BPRConfig 配置类设计与实现

## 2. 算法实现

- ✓ Dijkstra 最短路径算法
- ✓ BPR 拥堵系数计算
- ✓ 路径回溯机制

## 3. 文件处理

- ✓ CSV 地图文件解析
- ✓ demand.txt 需求文件解析
- ✓ 动态表头解析
- ✓ 异常处理和鲁棒性

## 4. 功能模块

- ✓ 多地图文件顺序处理
- ✓ 命令行参数解析
- ✓ UTF-8 编码支持
- ✓ 路径格式化输出

## 5. 代码质量

- ✓ 模块化设计
- ✓ 函数职责单一化
- ✓ 详细注释
- ✓ 错误处理完善

# 7.2 后续规划

## 阶段 1：测试与调试

- ☐ 测试所有提供的测试用例
- ☐ 验证输出格式是否符合要求
- ☐ 边界情况测试：
  - 空图
  - 不连通图
  - 起点终点相同
  - 单向路径
- ☐ 性能测试：大规模测试用例运行时间
- ☐ 修复发现的 Bug

## 阶段 2：优化与扩展

### 必须完成：

- ☐ 代码性能优化
- ☐ 代码重构和清理

#### 可选扩展：

- ☐ A\* 算法实现
- ☐ 路径可视化
- ☐ 输出多条（不同维度上的）最优路径供用户选择
- ☐ 参数敏感性分析实验

#### 阶段 3：最终文档

- ☐ 代码结构说明
- ☐ 算法实现细节
- ☐ 测试结果表格
- ☐ 遇到的问题与解决方案

## 八、编译与运行说明

### 9.1 开发环境

- 操作系统：Windows 11
- 编译器：MinGW-w64 GCC 14.2.0 / g++
- 标准：C++17
- IDE/编辑器：Visual Studio Code

### 9.2 编译命令

```
g++ -std=c++17 main.cpp Graph.cpp Edge.cpp config.cpp -o pathfinder.exe
```

### 9.3 运行示例

```
.\pathfinder.exe --test_path  
Test_Cases\test_cases\shanghai_test_cases\case1_simple
```

## 9.4 预期输出

```
Request: Find path from "上海科技馆" to "上海博物馆".

=====
Processing map:
Test_Cases/test_cases/shanghai_test_cases/case1_simple/map_1200.csv
=====
Path found! Total estimated time: 1234.56 seconds.
The shortest path is:
上海科技馆 --> 世纪大道 --> 人民广场 --> 上海博物馆
```

## 九、总结

本次中期检查已完成项目的核心功能开发，包括：

- 完整的图数据结构（邻接表）
- Dijkstra 最短路径算法
- BPR 拥堵系数建模
- 健壮的 CSV 文件解析
- 清晰的模块化设计

后续工作主要集中在测试、调试和文档完善，时间规划合理，风险可控。

项目完成后将具备：

1. 正确的路径规划功能
2. 良好的代码质量和可维护性
3. 完整的开发文档

距离实际应用还需要改进：实时性、可视化、多路径规划、性能优化等，这些已在第五部分详细讨论。