|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |  | 版 本： | V1.0 | |  |
|  | |  | |  | 密 级： | 内部 | |  |
|  | |  | |  | 总页数： | 10 | |  |
|  | | | | | | | | |
| 物联网实验室技术文档  路径规划服务软件  MAPF算法概要设计说明 | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | |
|  | **单 位** | |  | | | |  | |
|  | **编 写** | | 吕 昱 20230221 | | | |  | |
|  | **参与人** | | 曹松涛 | | | |  | |
|  | **校 对** | |  | | | |  | |
|  | **审 核** | |  | | | |  | |
|  | **批 准** | |  | | | |  | |
|  | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | |
| **易通星云（北京）科技发展有限公司** | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | |

**版本历史**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 版本/状态 | 作者 | 参与者 | 日期 | 备注 |
| V1.0/初稿 | 吕昱 |  | 2023-02-21 | 第一个版本 |
|  |  |  |  |  |

**目录**

[1 范围 2](#_Toc9649)

[1.1 标识 2](#_Toc23539)

[1.2 概述 2](#_Toc21294)

[1.2.1 系统概述 2](#_Toc3430)

[1.2.2 软件概述 3](#_Toc30005)

[1.2.3 GK平台软件子系统 — 路径规划模块组成 3](#_Toc22479)

[1.3 文档概述 4](#_Toc2462)

[2 引用文档 4](#_Toc12363)

[3 术语和定义 6](#_Toc27949)

[4 概要设计 7](#_Toc13370)

[4.1 算法输入与输出 7](#_Toc29862)

[4.2 算法概述 8](#_Toc1686)

[4.3 需突破关键算法技术及进度安排 9](#_Toc23388)

[4.4 算法核心技术点 10](#_Toc28856)

[4.4.1 动态路径规划 10](#_Toc6987)

[4.4.2 关联任务调度 23](#_Toc10894)

[4.5 前端调试 25](#_Toc8963)

[4.6 部署视图 26](#_Toc3416)

[4.7 软件更新 27](#_Toc16365)

[4.7.1 地图更新 27](#_Toc19805)

[4.7.2 执行程序更新 27](#_Toc1969)

[5 非功能设计 31](#_Toc31289)

[5.1 性能指标测试 31](#_Toc8642)

[5.2 扩展性 31](#_Toc17079)

[5.3 设计约束 31](#_Toc6749)

[6 需求可追踪性 32](#_Toc8269)

[6.1 从软件需求规格到概要设计的追踪关系 32](#_Toc29315)

[6.2 从软件概要设计到需求规格的追踪关系 32](#_Toc28604)

**路径规划服务软件MAPF算法概要设计说明**

# 范围

## 标识

a. 标识号：IOT.MAPF/ALG/1.0。

b. 标题：路径规划服务软件MAPF算法概要设计说明。

c. 本概要设计说明书适用于路径规划服务器软件。

## 概述

### 系统概述

本项目系统包含现场智能硬件设备、物联网软件、路径规划服务器软件、监控管理（后端）软件如图 1-1所示。

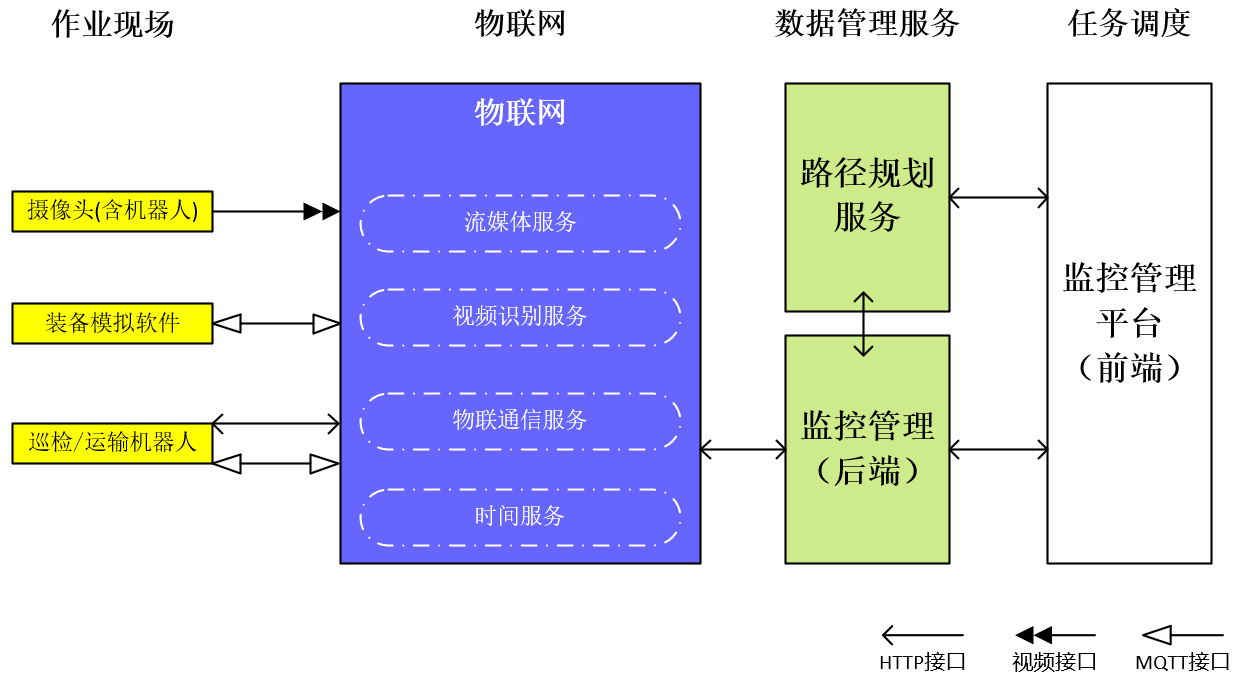


图 1-1系统组成图

### 软件概述

MAPF算法是路径规划服务软件的核心组成部份，它由C++实现，具有极高的运算性能。路径规划服务软件封装MAPF算法，对外部提供微服务接口，满足外部调用需要。路径规划服务软件架构如图 1-2。

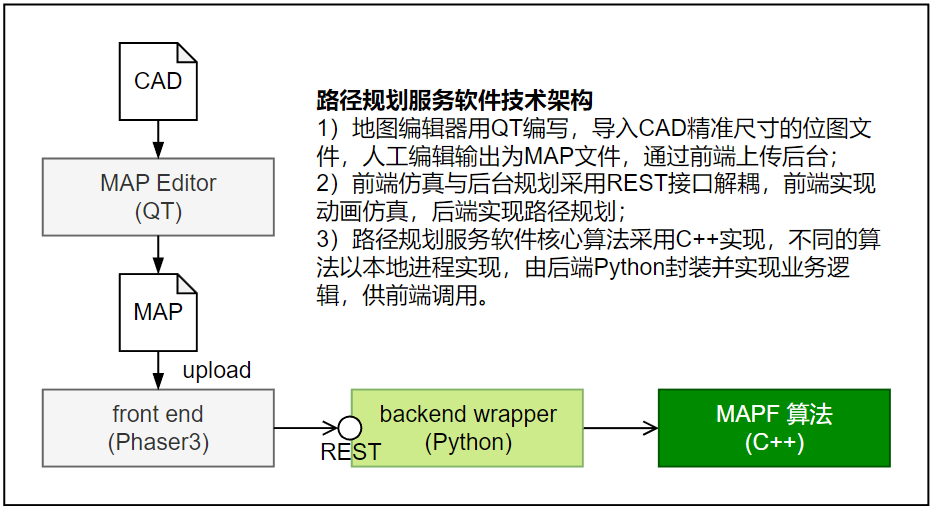
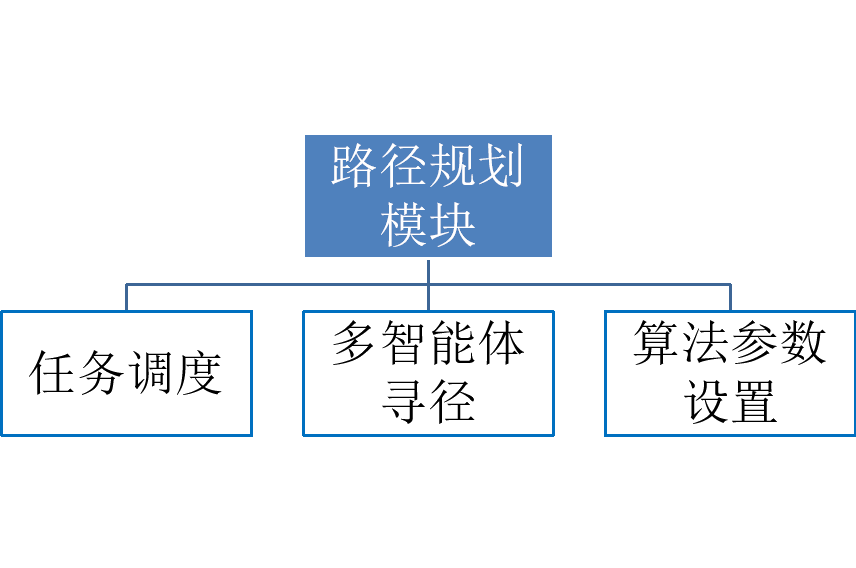


图 1-2路径规划服务软件架构图

### GK平台软件子系统 — 路径规划模块组成

路径规划模块由如下子模块构成。



任务调度：承担较复杂任务的AGV的工作模式通常包含从停车位到取货点，停留在取货点若干时间，从取货点到送货点，停留若干时间，根据自身电量和待分配任务情况，决定是否参与新任务，或补充电源，或移动到新的位置。当存在多个AGV资源和需要多任务并发执行时，任务调度功能按照预设规则决定AGV资源与任务的匹配逻辑，确保任务被能够完成任务的AGV承担，并且任务总体执行效率获得优化。

多智能体寻径：对在同一时空窗口多AGV的移动，会出现为每个AGV分别规划其行走路径以避免它们相互之间发生冲突的问题。多智能体寻径功能解决给定时刻，同时从地图不同起点出发的多个AGV，总能被分配优化的路径相互不冲突的到达要求的目的地。同时，多智能体寻径还支持持续规划路径，即在地图上已知多个AGV正在执行任务，且其路径已知的情况下，可以为新的AGV规划不冲突的路径。

算法参数设置：由于任务调度和多智能体寻径都被证明属于NP困难的，因此当前智能算法多需要引入不同启发规则、地图参数等以获得最好的效果。除了算法参数本身需要根据具体问题进行调测，还存在比如任务优先级、冲突消解规则等多种业务相关的用户场景类参数需要设置。算法参数设置支持上述两种不通类型的参数设置。

## 文档概述

本文档重点描述路径规划服务软件的MAPF算法，如图 1-2中深绿色部份。

# 引用文档

[1] Guni Sharon, Roni Stern, Ariel Felner, and Nathan R. Sturtevant. Conflict-Based Search for Optimal Multi-Agent Pathfinding. Artificial Intelligence, 219:40–66, 2015.

[2] Eli Boyarski, Ariel Felner, Roni Stern, Guni Sharon, David Tolpin, Oded Betzalel, and Solomon Eyal Shimony. ICBS: Improved Conflict-Based Search Algorithm for Multi-Agent Pathfinding. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pages 740–746, 2015.

[3] Eli Boyarski, Ariel Felner, Guni Sharon, and Roni Stern. Don't Split, Try to Work It Out: Bypassing Conflicts in Multi-Agent Pathfinding. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), pages 47-51, 2015.

[4] Ariel Felner, Jiaoyang Li, Eli Boyarski, Hang Ma, Liron Cohen, T. K. Satish Kumar, and Sven Koenig. Adding Heuristics to Conflict-Based Search for Multi-Agent Path Finding. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), pages 83-87, 2018.

[5] Jiaoyang Li, Ariel Felner, Eli Boyarski, Hang Ma, and Sven Koenig. Improved Heuristics for Multi-Agent Path Finding with Conflict-Based Search. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pages 442-449, 2019.

[6] Jiaoyang Li, Daniel Harabor, Peter J. Stuckey, Hang Ma, and Sven Koenig. Symmetry-Breaking Constraints for Grid-Based Multi-Agent Path Finding. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), pages 6087-6095, 2019.

[7] Jiaoyang Li, Daniel Harabor, Peter J. Stuckey, and Sven Koenig. Pairwise Symmetry Reasoning for Multi-Agent Path Finding Search. CoRR, abs/2103.07116, 2021.

[8] Jiaoyang Li, Graeme Gange, Daniel Harabor, Peter J. Stuckey, Hang Ma, and Sven Koenig. New Techniques for Pairwise Symmetry Breaking in Multi-Agent Path Finding. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), pages 193-201, 2020.

[9] Han Zhang, Jiaoyang Li, Pavel Surynek, Sven Koenig, and T. K. Satish Kumar. Multi-Agent Path Finding with Mutex Propagation. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), pages 323-332, 2020.

[10] Jiaoyang Li, Daniel Harabor, Peter J. Stuckey, Ariel Felner, Hang Ma, and Sven Koenig. Disjoint Splitting for Multi-Agent Path Finding with Conflict-Based Search. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), pages 279-283, 2019.1.

[11] Stern R, Sturtevant N, Felner A, et al. Multi-agent pathfinding: Definitions, variants, and benchmarks[C]//Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search, pages 151-158, . 2019, 10.

[12] Wen L, Liu Y, Li H. CL-MAPF: Multi-agent path finding for car-like robots with kinematic and spatiotemporal constraints[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 150: 103997.

[13] Andreychuk A, Yakovlev K, Surynek P, et al. Multi-agent pathfinding with continuous time[J]. Artificial Intelligence, 2022, 305: 103662.

[14] Madar N, Solovey K, Salzman O. Leveraging Experience in Lifelong Multi-Agent Pathfinding[C]//Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search. 2022, 15(1): 118-126.

[15] Okumura K, Machida M, Défago X, et al. Priority inheritance with backtracking for iterative multi-agent path finding[J]. Artificial Intelligence, 2022, 310: 103752.

[16] Song S, Na K I, Yu W. Anytime Lifelong Multi-Agent Pathfinding in Topological Maps[J]. IEEE Access, 2023.

# 术语和定义

表3-1 术语和定义表

|  |  |
| --- | --- |
| 术语 | 定义 |
| MAPF | 多智能体路径查找（Multi-agent pathfinding），是对一组智能体从指定的起点位置到指定的目标位置的无碰撞路径规划，该问题一个优化问题。MAPF与图论的最短路径问题密切相关，当前已经提出了几种算法来解决MAPF问题。 |
| CBS | 基于冲突的搜索（Conflict-based search），是当前最先进的MAPF算法。 |
| STA\* | 时空A星（Space time A star）搜索算法是路径查找和图形遍历中使用的最好和流行的启发式路径搜索算法技术。 |

# 概要设计

## 算法输入与输出

【输入】

格式待定，内容为：

（0）算法类型，比如PIBT，CBS，RL（强化学习）。

（1）包含要参与路径规划的Agent数量。

（2）每个Agent的起点和终点。

（3）此前已经规划的若干Agent正在执行的路径（走过的路径点不需要）。

注意，（3）仅是针对在线实时规划的参数，不提供的话缺省为静态规划，如果给出这个参数，本算法输出（1）（2）中要求的路径会规避（3）中的路径冲突点。

【输出】

如果是PIBT类型算法，则输出格式如下，字符串。下面示例含义为从0时刻到74时刻（行）4个Agent（列）的网格位置。

var pibt\_solution=`

0:(21,20),(24,34),(6,3),(9,13),

1:(22,20),(24,33),(7,3),(8,13),

……

71:(35,19),(42,8),(36,44),(6,7),

72:(35,19),(42,8),(37,44),(6,7),

73:(35,19),(42,8),(38,44),(6,7),

74:(35,19),(42,8),(39,44),(6,7)

`

如果是CBS类型算法，则输出格式如下，字符串。下面示例含义为从0时刻，有3个Agent，分别是pts0、pts1、pts2的逐时刻的路径点。

var cbs\_solution = `

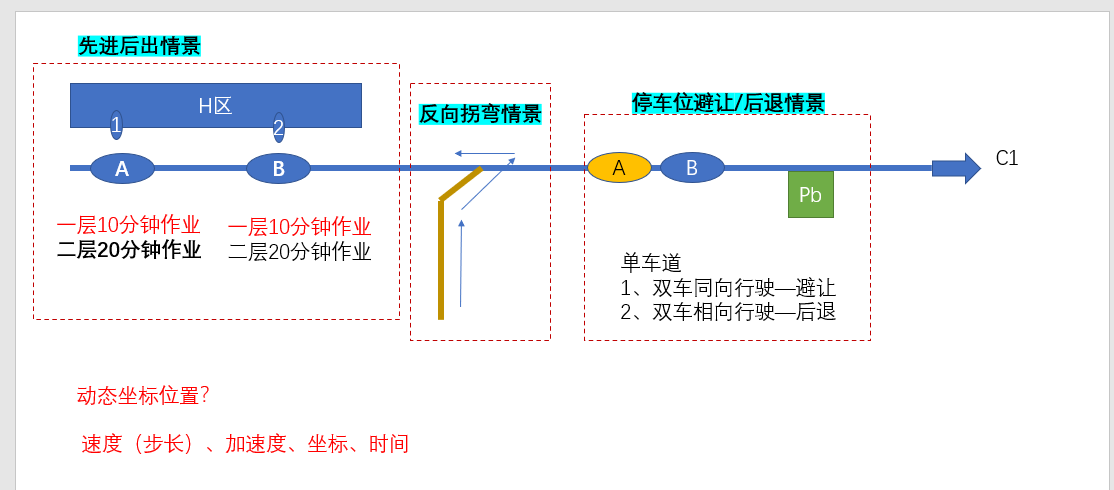
"pts0": [[8,8],[8,8],[8,8],[8,8],[8,16],[8,24],[8,24],[8,32],[8,40],[8,40],[8,40],[8,40],[8,32],[8,32],[16,32],[16,32],[16,24],[24,24],[32,24],[40,24],[48,24],[56,24],[64,24],[72,24],[80,24],[88,24],[96,24],[104,24],[112,24],[120,24],[120,32],[120,40],[120,48],[120,56],[120,64],[120,56],[120,48],[120,40],[120,32],[120,24],[120,16],[120,24],[120,32],[120,40],[120,48],[120,56],[120,64],[120,72],[120,80],[120,88],[120,96],[120,104],[120,112],[120,120],[120,128],[120,136],[120,144],[120,152],[120,160],[120,168],[120,176],[120,184],[120,192],[120,200],[120,208],[120,216],[120,224],[128,224],[136,224],[144,224],[152,224],[152,232],[160,232],[168,232],[176,232],[184,232],[192,232],[200,232],[208,232],[216,232],[224,232],[232,232]],

"pts1": [[232,232],[224,232],[216,232],[216,224],[208,224],[200,224],[192,224],[184,224],[176,224],[168,224],[160,224],[152,224],[144,224],[136,224],[128,224],[120,224],[120,216],[120,208],[120,200],[120,192],[120,184],[120,176],[120,168],[120,160],[120,152],[120,144],[120,136],[120,128],[120,120],[120,112],[120,104],[120,96],[120,88],[120,80],[120,72],[120,64],[120,56],[120,48],[120,40],[120,32],[120,24],[112,24],[112,16],[104,16],[96,16],[96,8],[88,8],[80,8],[72,8],[64,8],[56,8],[48,8],[40,8],[32,8],[24,8],[16,8],[8,8]],

"pts2": [[96,224],[104,224],[112,224],[120,224],[120,216],[120,208],[120,200],[120,192],[120,184],[120,176],[120,168],[120,160],[120,152],[120,144],[120,136],[120,128],[120,120],[120,112],[120,104],[120,96],[120,88],[120,80],[120,72],[120,64],[120,56],[120,48],[120,40],[120,32],[120,24],[120,16],[112,16],[104,16],[96,16],[88,16],[80,16],[72,16],[64,16],[56,16],[48,16],[40,16],[32,16],[24,16],[16,16]]

`

需要补充说明的问题。



如上图三种场景。

（1）一个复杂任务，在先进后出场景，如何再次调度启动寻径呢？比如A先完成任务，但B还在作业挡住A的位置，A肯定找不到路径。B作业完成后可以再次调度，把A也带上一并规划。如果这个策略可以，那么可以部份解决这个问题。

## 算法概述

在以前项目基础上，已经实现CBS基础算法跨平台编译与运行。

CBS基于冲突的搜索是最优最先进的混合MAPF算法，算法由两层搜索过程组成，底层搜索为每个agent搜索出一条有效路径。上层搜索负责检查路径冲突，并选择其中代价最小的分支重新进行底层路径搜索，直到上层搜索发现有效路径为止。

针对多AGV路径规划，采用基于冲突的搜索算法CBS，将MAPF分为两层去求解，下层采用优化的基于曼哈顿距离的STA\*算法解决多个单AGV路径规划问题，算法的上层采用约束树结点解决多个 AGV 路径间的冲突问题。

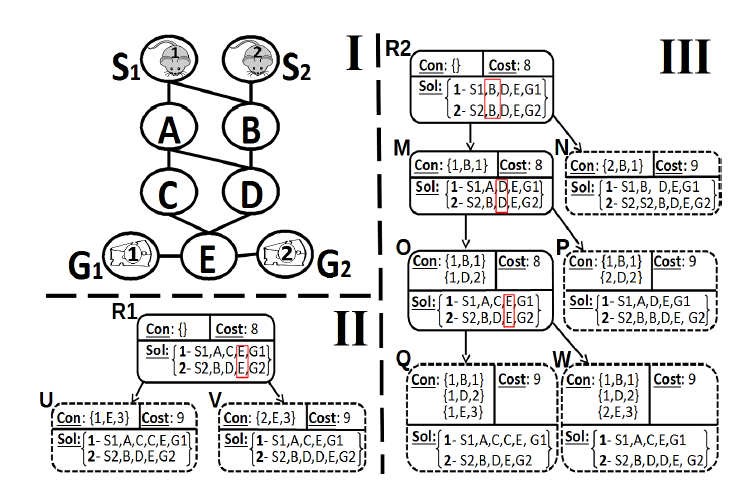
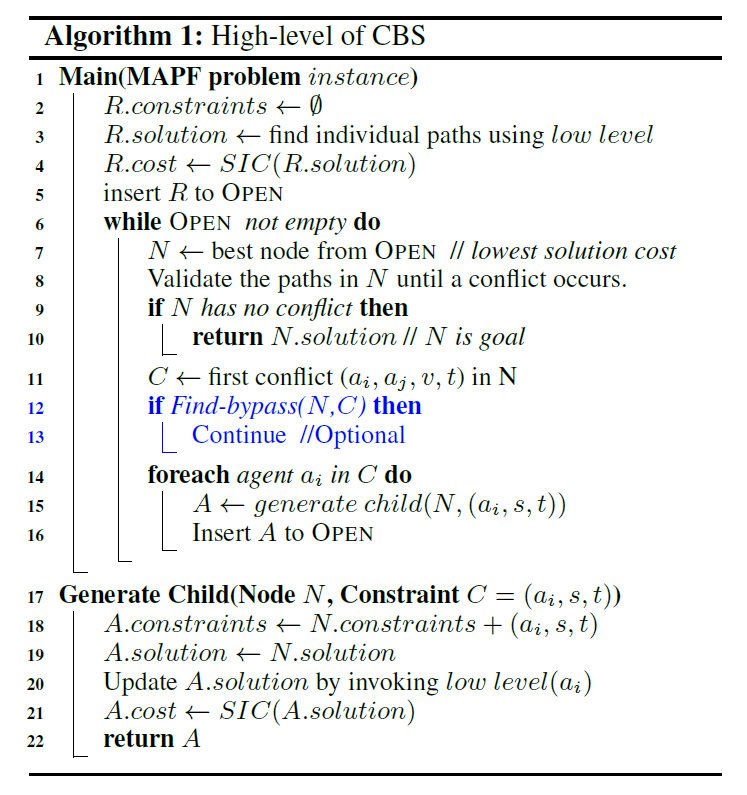


图 4‑1 上层CT树搜索算法逻辑

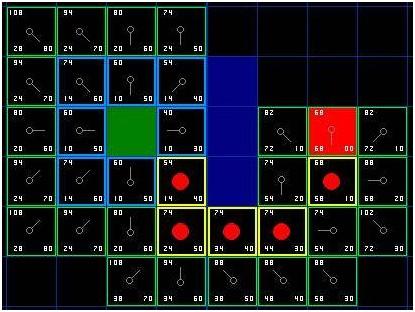
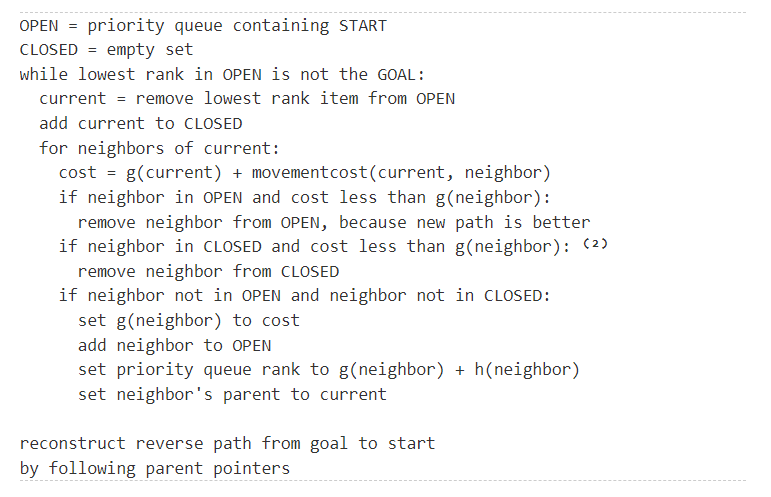


图 4‑2 底层STA\*算法逻辑

## 需突破关键算法技术及进度安排

CBS算法在若干场景效率很低，无法满足实时路径规划的需要。针对不同地图场景和优化目标的需要，拟定了如下的算法优化路径。

算法第一阶段解决静态路径规划的优化问题，第二阶段解决算法动态路径规划的问题。其中静态路径规划是输入地图环境和多车辆起点和终点，假定地图环境净空和多车同时开始启动，规划多车起点到终点的不冲突且总时间最优路径；动态路径规划在静态路径规划基础上，取消地图环境净空假定，提供正在运行的车辆的路径规划，规划新一批同时启动车辆的不冲突且总时间最优路径（不变动正在运行的车辆的路径规划）。

表 4-1 优化CBS技术点及进度安排

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **优化技术** | **人员** | **开始时间** | **结束时间** | **人日** |
| 走廊推理优化 | 吕昱 | 2023/2/11 | 2023/2/14 | 4 |
| 优先级冲突求解 | 曹松涛 | 2023/2/14 | 2023/2/17 | 4 |
| 旁路冲突求解 | 吕昱 | 2023/2/15 | 2023/2/17 | 3 |
| 高阶可接受启发函数WDG/CG/DG分析优化 | 曹松涛 | 2023/2/18 | 2023/2/20 | 3 |
| 矩形推理优化 | 吕昱 | 2023/2/18 | 2023/2/20 | 3 |
| 目标推理优化 | 曹松涛 | 2023/2/21 | 2023/2/24 | 4 |
| 互质体推理优化 | 吕昱 | 2023/2/21 | 2023/2/24 | 4 |
| 不相交分裂优化 | 曹松涛 | 2023/2/26 | 2023/2/28 | 3 |
| 开发静态规划算法 | 吕昱 | 2023/2/25 | 2023/2/28 | 4 |
| 确定静态规划算法方案 | 吕昱 | 2023/2/28 | 2023/3/10 | 11 |
| 封装算法库，供外部使用 | 曹松涛 | 2023/2/28 | 2023/3/10 | 11 |
| 确定动态算法技术方案 | 吕昱 | 2023/3/1 | 2023/3/6 | 6 |
| 开发动态规划算法 | 吕昱 | 2023/3/7 | 2023/3/17 | 11 |
| 更新算法封装库 | 曹松涛 | 2023/3/11 | 2023/3/23 | 13 |
| 开发算法库上层业务 | 曹松涛 | 2023/3/24 | 2023/3/31 | 8 |
| 联调路径规划算法并改进 | 吕昱 | 2023/3/18 | 2023/3/31 | 14 |

## 算法核心技术点

### 动态路径规划

【问题描述】

在线实时路径规划——需要解决静态规划存在的问题。CBS算法顶层不做修改，主要需要在底层每次针对每个Agent寻路的时候，找最短路径，同时规避掉约束表中的哪些冲突点位。底层算法需要规避CBS顶层父节点和本次冲突点构造的约束以外，还需要规避以前规划所要求的一些地图上的动态路径点。

约束表有两个约束表：

（1）一是CBS标准算法所要求的，就是顶层算法会评估本次规划产生的冲突点位，然后构造约束表后，传给底层算法，要求其规避。

（2）二是用户传入的此前已经规划并被占据的路径点。

【测试方案】

（1）

zxk-105x34.map

tasks: [{"s":[34,21],"e":[11,20]},{"s":[34,22],"e":[13,20]}]

（2）

zxk-105x34.map

tasks: [{"s":[34,21],"e":[11,20]},{"s":[34,22],"e":[13,20]}]

planned\_paths

"psd0":[[33,17],[33,18],[33,19],[33,20],[33,21],[33,22],[34,22]]

（3）

zxk-105x34.map

tasks:[{"s":[34,21],"e":[82,19]}]

（4）

zxk-105x34.map

tasks:[{"s":[82,19],"e":[20,12]}]

（5）

zxk-105x34.map

tasks:[{"s":[34,22],"e":[81,20]}]

（6）

zxk-105x34.map

tasks:[{"s":[81,20],"e":[33,7]}]

（0）

zxk-105x34.map

tasks: [{"s":[34,21],"e":[11,20]},{"s":[34,22],"e":[13,20]}]

无实质动态障碍，解如下。

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[34,22],[34,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

上述路径含义：pts0一马当先，pts1先等着，然后依次到达目标点。

**第一个动态约束场景——增加从两个起点前方经过，从上向下的动态约束。**

planned\_paths

"psd0":[[33,20],[33,21],[33,22],[33,23]]

【正确求得解】

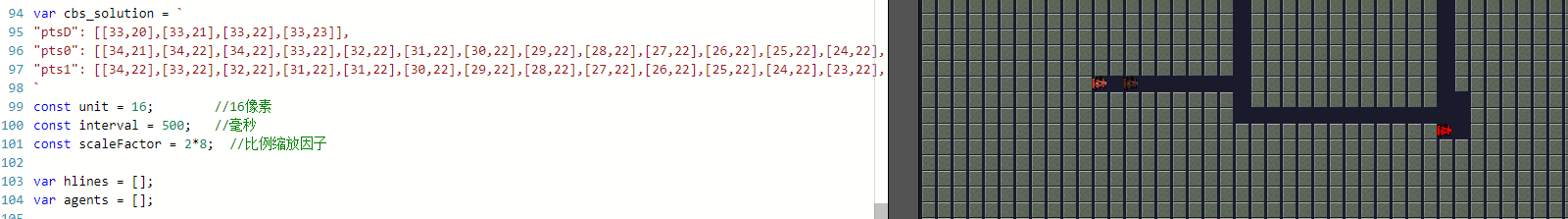
最初发现没有任何影响！这是一个bug，Instance载入地图数据的时候，没有动态载入地图的宽度，导致载入的动态障碍数据计算错误，修改bug后，可以寻到路径如下。

"pts0": [[34,21],[34,22],[34,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[33,22],[32,22],[31,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[20,19],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

这个路径pts1先领先前行，pts0在后面第3步等待一次，后续在[20,20]，pts1向上走一步，等待pts0超越，再继续前行。

为便于观察动画运行效果，可在前端可视化界面，把动态障碍路径也作为solution填入，并将其设置为第一个位置，并且设置特别的颜色，便于观察。



**第二个动态约束场景——在[20,20]点占据一定时间后让开。**

planned\_paths

"psd0":

[[20,12],[20,13],[20,14],[20,15],[20,16],[20,17],[20,18],[20,19],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20]]

【无法求得正确解】

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[33,22],[33,23],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,21],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

问题分析：没有检查到冲突，在如下代码没有发挥作用。原因是timestep--后，给的动态障碍就被跳过了，时间步长不一样。

通过添加一个dynamictimesteop属性到LLNode，然后用这个属性做控制变量，的确可以检测到冲突了，但新的问题出现——找不到路径了。在generateRoot函数中，找不到路径。



修改上图，在动态障碍出现，添加如下代码。



generateRoot可以找到绕开动态障碍的路径了，但是在本测试案例中，出现冲突。具体来说，agent0在15步（0开始）到达2330，16步到达2225，然后等待17，18，在19步2225时，agent1在2330等待到18步后（15步在2331，16步到2330，然后等待17，18），agent1在19步进入2225，发生冲突。路径图示如下。

在search\_engines的findPath函数寻路的时候，会输入CBSNode的指针，函数内会给CBSNode对象建立冲突规避表。CBSNode被放进allNodes\_table后，会紧接调用findConflicts，发现冲突，冲突被放到unknownConf的list中。

后续while循环，持续取出cbs节点，先检查有无冲突，无冲突，则说明找到解，退出while循环。



否则，如果该节点没有进行启发规则计算，这开始启发计算规则：先看PC参数，是否要区分冲突的优先级（冲突优先级是先解决哪个冲突，后解决哪个冲突，这有助于提高搜索效率）。缺省是PC支持的，所以会分类冲突，上图案例，2113节点被选中，然后调用computeInformedHeuristics函数，计算启发规则。缺省是WDG类型，加权依赖图，修改整个STA的寻路算法，发现可以搞定。就是在原来，判断能否STA\*转化为普通A\*的判断条件中，添加一项同时满足条件：

constraint\_table.last\_pct\_planned\_timestep < curr->timestep - 1，当timestep要增加到大于动态障碍的最晚存在时间后，转化为静态A\*。

A\*对每个节点的权重的计算如下公式：



g为实际权重，h为启发距离。

A\*寻路的过程：

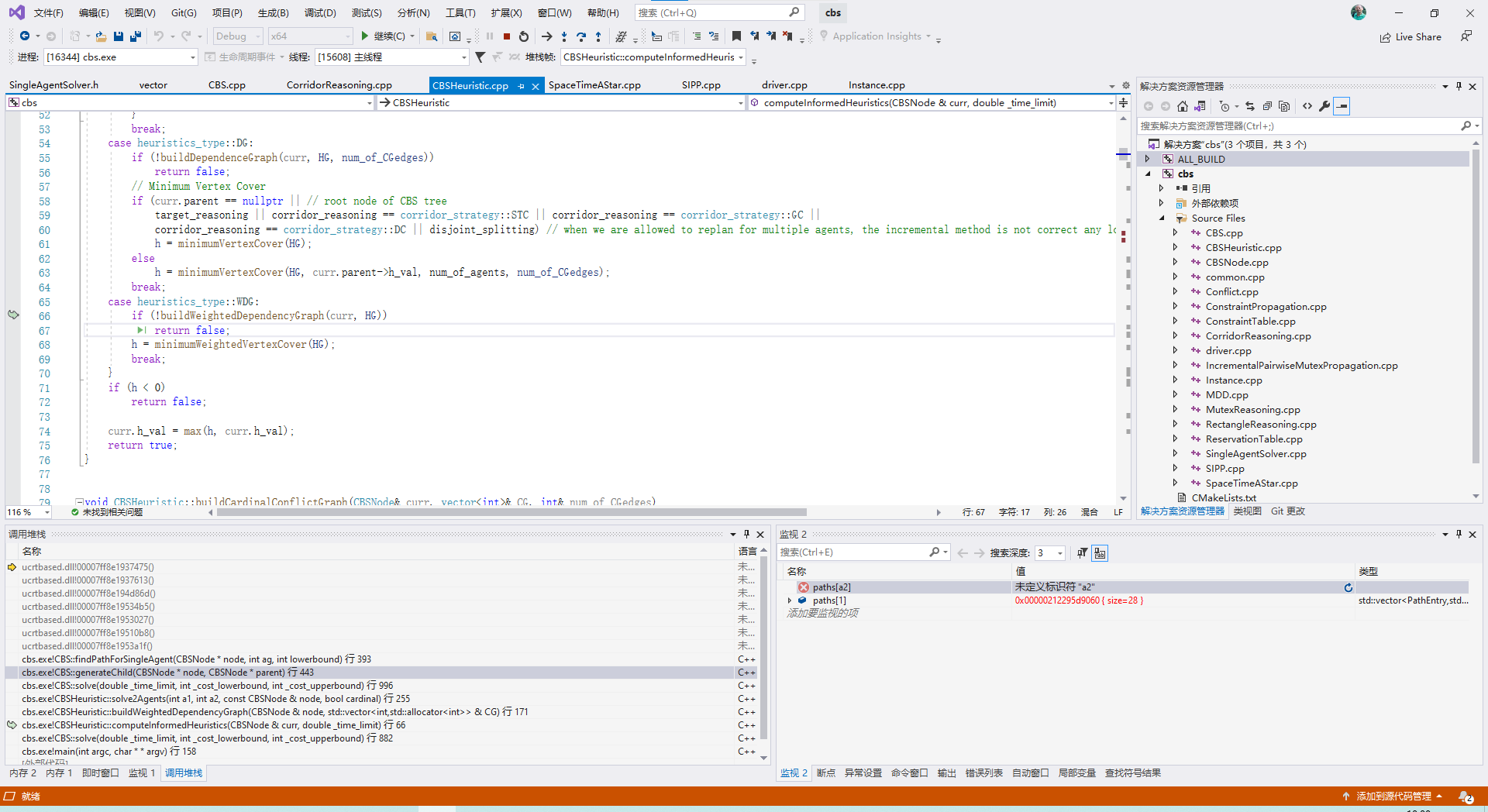
（1）外循环：frontier集（open list）先出一个最小f值节点；

（2）然后以该节点出发，getNeighbors（需要涉及到地图中的静态障碍），得到几个待考查相邻节点；

（3）内循环：对每个相邻节点做操作；

是否存在动态障碍约束冲突，如果是，怎么办？

在出现动态障碍约束冲突时，添加了不冲突节点加入前线集合的代码，在generateRoot中成功找到等待的路径，但在generateChild出现了相同路径诊断错误。具体是在WDG计算中。



调整dynamictimestep的位置，然后路径就正确找到了。内循环出现动态障碍时的主要逻辑是：

首先看动态障碍是否与当前待考查节点冲突，如果冲突，continue，考核下一个待考查节点。

如果不冲突，则准备将当前待考查节点纳入open表，是否纳入有几个问题：

1）如果时间过的比较久，到达上次冲突最后一个时间步，并且也超过动态障碍出现的最大时间步，问题变成普通静态A\*（空间）而不是时空A\*，则不考虑Neighbors中本地不动等待一拍这种节点的情况静态A\*不需要等在固定位置，next\_timestep--确保不再增加新的时空备选节点。

2）两种情况，如果1）中没有触发next\_timestep--，则看看新的时空节点是否不碰撞，如果不碰撞，说明值得探索，放入OPEN集合待考查。如果1）触发next\_timestep--则说明已经退化为静态A\*，不需要继续增加待考查新节点到OPEN，把已有的OPEN中的节点找到按启发规则去找最小f值节点继续考查即可。

代码修改思路：载入动态障碍的时候，可以计算最晚障碍，即最远路径有多少个步长的时间。

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,21],[20,21],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[34,21],[34,21],[34,21],[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

但是目前约束表的设计存在问题。

约束表是一个无序hash表，数据结构是

unordered\_map<size\_t, list<pair<int, int> > >\* pct\_planned

pct\_planned这个数据结构在多条已规划路径的时候是这样的。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| col，row | location | tmin | tmax |
| 20，19 | 2015 | 7 | 8 |
| 20，20 | 2120 | 8 | 9 |
| 9 | 10 |
| 10 | 11 |
| 11 | 12 |
| 12 | 13 |
| 13 | 14 |
| 14 | 15 |
| 15 | 16 |
| 16 | 17 |
| 17 | 18 |
| 18 | 19 |
| 19 | 20 |
| 20，12 | 1280 | 0 | 1 |
| 20，13 | 1385 | 1 | 2 |
| 20，14 | 1490 | 2 | 3 |
| 20，15 | 1595 | 3 | 4 |
| 20，16 | 1700 | 4 | 5 |
| 20，17 | 1805 | 5 | 6 |
| 20，18 | 1910 | 6 | 7 |

1）(\*pct\_planed)[location]内装的是一个时间段，range，冲突与否是测试该时间段该位置点tmin <= t < tmax，即如果在某个点，某个时间步处于range内，就算冲突。

2）在ConstraintTable.h文件中的构造函数和拷贝构造函数中添加一个属性，记录最大动态障碍时间步长，然后在构造生成动态障碍约束表的时候，把这个值算出来，作为STA\*算法转静态A\*的条件阈值。

【测试案例】

地图：zxk-105x34地图，参考zxk-105x34.xlsx文件。

（1）测试用例1：通过。

（2）测试用例2：通过。

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,21],[20,21],[20,21],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[34,21],[34,22],[34,22],[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

（3）测试用例3：不通过。修改代码后通过。

"psdA":[[20,12],[20,13],[20,14],[20,15],[20,16],[20,17],[20,18],[20,19],[20,20], [20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20]]

"psdB":[[29,22],[30,22],[31,22],[32,22],[33,22], [33,21],[33,20],[33,19],[33,18],[33,17],[33,16],[33,15],[33,14],[33,13],[33,12],[33,11],[33,10],[33,9],[33,8],[33,7]]

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,21],[20,21],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[34,23],[34,23],[34,23],[34,23],[34,23],[34,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

冲突分析：（从前端看似乎冲突了）

"psdB":[[29,22],[30,22],[31,22],[32,22],[33,22], [33,21],[33,20],[33,19],[33,18],[33,17],[33,16],[33,15],[33,14],[33,13],[33,12],[33,11],[33,10],[33,9],[33,8],[33,7]]

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,21],[20,21],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

pts0从33,22和ptsB从32,22对向穿越。算法需要看看agent0：

33,22（2343）到32,22（2342），在nexttime=4的时候，边约束表没有发挥作用。边约束表就没有建立起来。

这个bug通过添加边约束，得到解决。

"pts0": [[34,21],[33,21],[33,22],[33,22],[33,23],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[34,22],[34,22],[34,21],[34,21],[33,21],[34,21],[33,21],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20]]

（4）测试用例4：不通过。

分析原因：在generateRoot函数中，没有找到路径。首先，agent0找到一个30步的路径，agent0触发后，在20,20的堵点等待，然后直接进入。但是agent1却完全忽略了动态障碍，直接没停留的走到了目标点，24步。

为什么动态约束没有发生作用，对于agent1，检查约束条件，第7步动态障碍还没有出现在20,20，所以agent1能正常通过，没有问题。

"psdA":

[[20,12],[20,13],[20,14],[20,15],[20,16],[20,17],[20,18],[20,19],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20]]

"pts0": [[34,21],[34,21],[34,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[20,19],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[13,20],[14,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[13,20],[14,20],[15,20],[16,20],[17,20],[17,20],[18,20],[19,20],[20,20],[20,21],[20,22],[21,22],[22,22],[23,22],[24,22],[25,22],[26,22],[27,22],[28,22],[29,22],[30,22],[31,22],[32,22],[33,22],[34,22]]

已经完成修改的代码，添加约束。

问题解决的思路：

1）generateRoot找到哪两条路。

2）generateChilde找路似乎没找到。

3）出现死循环，又不停调用generateRoot函数。这是因为从open\_list出来CBS节点的h\_computed都没有计算，所以要看h\_computed这些节点是怎么生成的。CBS上层搜索算法。

Agent 0 (29 -->30): 2239->2344->2344->2343->2343->2342->2341->2340->2339->2338->2337->2336->2335->2334->2333->2332->2331->2331->2331->2330->2225->2120->2119->2118->2117->2116->2115->2114->2113->2112->2111->

Agent 0 (29 -->29): 2239->2239->2238->2343->2343->2342->2341->2340->2339->2338->2337->2336->2335->2334->2333->2332->2331->2330->2330->2225->2120->2119->2118->2117->2116->2115->2114->2113->2112->2111->

Agent 1 (23 -->35): 2113->2114->2115->2116->2117->2118->2119->2120->2225->2330->2225->2225->2225->2330->2331->2332->2333->2333->2334->2334->2334->2335->2335->2335->2335->2334->2335->2336->2337->2338->2339->2340->2341->2342->2343->2344->

Timeout,-1,1200.01,2167,577817,65,52,63,

600cutetime

Agent 0 (29 -->29): 2239->2239->2238->2343->2343->2342->2341->2340->2339->2338->2337->2336->2335->2334->2333->2332->2331->2330->2330->2225->2120->2119->2118->2117->2116->2115->2114->2113->2112->2111->

Agent 1 (23 -->35): 2113->2114->2115->2116->2117->2118->2119->2120->2225->2225->2330->2330->2330->2331->2332->2333->2333->2333->2334->2333->2333->2333->2333->2334->2334->2335->2336->2336->2337->2338->2339->2340->2341->2342->2343->2344->

Timeout,-1,600.004,1073,270466,64,52,63,

60cuttime

Agent 0 (29 -->29): 2239->2238->2238->2238->2343->2342->2341->2340->2339->2338->2337->2336->2335->2334->2333->2332->2331->2330->2225->2225->2120->2119->2118->2117->2116->2115->2114->2113->2112->2111->

Agent 1 (23 -->35): 2113->2114->2115->2116->2117->2118->2119->2120->2225->2225->2225->2330->2330->2225->2225->2330->2225->2330->2331->2331->2330->2331->2331->2332->2333->2334->2335->2336->2337->2338->2339->2340->2341->2342->2343->2344->

Timeout,-1,60.002,131,39066,64,52,63,

30cuttime

Agent 0 (29 -->29): 2239->2344->2343->2342->2341->2340->2339->2338->2337->2336->2335->2334->2333->2332->2331->2331->2330->2330->2225->2225->2120->2119->2118->2117->2116->2115->2114->2113->2112->2111->

Agent 1 (23 -->35): 2113->2114->2115->2116->2117->2118->2119->2120->2225->2330->2330->2330->2330->2331->2332->2333->2333->2333->2333->2332->2332->2331->2332->2333->2333->2334->2335->2336->2337->2338->2339->2340->2341->2342->2343->2344->

Timeout,-1,30.007,68,21601,64,52,63,

**算了5个小时**

动态路径：

"psdA":[[20,12],[20,13],[20,14],[20,15],[20,16],[20,17],[20,18],[20,19],[20,20], [20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20],[20,20]]

运算结果：

WDG+GR+GC+T+BP with AStar : Optimal Solution Founded,66,18059.6,30039,7871307,66,51,62,

"pts0": [[34,21],[34,22],[34,21],[34,22],[33,22],[32,22],[31,22],[30,22],[29,22],[28,22],[27,22],[26,22],[25,22],[24,22],[23,22],[22,22],[21,22],[20,22],[20,21],[20,20],[20,19],[20,20],[19,20],[18,20],[17,20],[16,20],[15,20],[14,20],[13,20],[12,20],[11,20]],

"pts1": [[13,20],[12,20],[12,20],[11,20],[12,20],[12,20],[12,20],[11,20],[11,20],[12,20],[11,20],[12,20],[13,20],[13,20],[14,20],[15,20],[16,20],[17,20],[18,20],[19,20],[20,20],[20,21],[20,22],[21,22],[22,22],[23,22],[24,22],[25,22],[26,22],[27,22],[28,22],[29,22],[30,22],[31,22],[32,22],[33,22],[34,22]]

（5）测试用例5：通过。

测试案例4中，如果动态障碍到t16，就可以寻路成功，到t17就失败。

（6）测试用例6：通过。

（7）测试用例7：通过。

【算法解读】

引入动态约束后，CBS类generateRoot寻找初始路径，给出了不同的初始路径，规避了动态障碍的冲突。但初始解路径是不考虑相互之间冲突的，冲突由上层算法进行检测，发现冲突，重新更新约束表，再调用底层算法findPath（以及findShortestPath）寻找新路径。

源码中上层代码比较混乱，主要功能流程就是FOCAL保存了带权重的最小值节点，从而方便在搜索空间中选择合适的候选节点。

路径规划上层算法：

该函数的执行过程与后面分裂子节点，每个子节点操作基本相同，分为：

1）调用generateRoot函数。对每个Agent调用findPath，paths\_found\_initially，对paths\_found\_initially数组赋值，放到openlist和focallist，然后findConflicts。

2）开始循环。

出focallist，对出栈节点，updatePaths，将paths数组赋值。

是否无冲突，如果无冲突，则找到解决方案。

有冲突，是否启发寻径过，如果没有WDG递归，CG。

在CBS代码中，WDG是Weighted Degree Heuristic的缩写，WDG (Weighted Dependency Graph)：加权依赖图。WDG是一种数据结构，用于表示多智能体路径规划问题中智能体之间的依赖关系。它将智能体之间的依赖关系表示为一个有向图，其中节点表示智能体的位置和时间步，边表示依赖关系。权重用于表示依赖关系的强度或重要性，可以用来指导路径规划的决策过程。

CG是Cardinal Conflict Graph (CG) 是 CBS 算法中使用的一种图结构，用于表示多智能体路径规划中的冲突关系。在路径规划过程中，冲突可能发生在智能体之间，例如在共享资源上的冲突或交叉路径上的冲突。Cardinal Conflict Graph 的节点表示路径规划的状态，边表示冲突关系。该图的构建和搜索过程通常使用冲突检测方法，如 Cardinal Conflict Detection（基于基数的冲突检测）。在 CBS 算法中，Cardinal Conflict Graph 用于检测冲突并解决它们，以逐步构建最优的路径规划解决方案。通过搜索 Cardinal Conflict Graph，可以确定哪些冲突需要解决，并在解决过程中调整智能体的路径，以实现冲突的解决和路径规划的优化。

新地图

该地图之前

-m zxk-105x34.map -a bug\_zxk105x34\_0.scen -p bug\_dynamic0.paths -o test.csv --outputPaths=bug\_res\_0\_paths105x34.json -k 2

改地图之后

-m zxk-54x20.map -a zxk-54x20.scen -p dynamic.paths -o test.csv --outputPaths=paths54x20.json -k 2

### 关联任务调度

【问题描述】

动态路径规划解决当前正在运行状态下的可以持续插入新路径规划。对于一次较复杂的任务，一般包含从停车位到取货点，停留在取货点若干时间，从取货点到送货点，停留若干时间，回到停车位。对于这样的复杂任务，特别是多个这样复杂任务并行的环境下，完成动态路径规划是相对复杂的问题，需要解决动态路径规划的时机问题。

【解决方案】

（1）任务关系表如下，类似一个链表，一个出库任务比如开始于0#任务（链表头），分为1#从停车点到取货点，2#停留，3#取货点到送货点，...。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **任务** | **任务类型** | **任务状态** | **后续任务** |
| 0# | 队列头 | 规划/完成/执行中... | 1 |
| 1# | 路径任务 | 规划/完成/执行中... | 2 |
| 2# | 路径任务 | 规划/完成/执行中... | 3 |
| 3# | 路径任务 | 规划/完成/执行中... | 4 |
| 4# | 维护任务（不占通道） | 规划/完成/执行中... | ^ |

SELECT task\_id, next\_task\_id

FROM task\_chain

INNER JOIN (

SELECT 'start\_task' AS a # 111为头节点Id

UNION

SELECT @next\_id AS a

FROM task\_chain,

(SELECT @next\_id := 'start\_task') n

WHERE task\_id = @next\_id

AND @next\_id := next\_task\_id

# 其他条件

) ids

ON task\_chain.task\_id = ids.a;

（2）路径任务表如下，是占用地图的所有路径相关的任务，包括运输任务，停机等待任务，寻路任务等，它与路径规划密切相关。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **路径任务** | **车辆** | **实际开始时间** | **实际完成时间** | **规划开始时间** | **规划完成时间** |
| 1# | AGV1 |  |  | 0 | 3 |
| 2# | AGV1 |  |  | 4 | 10 |

（3）规划路径表如下，记录规划的路径，可以考虑用关系数据库或时序数据库存。但需要注意规划之后修改的问题，可以分为临时表和生效表。临时表用于过程中的数据记录。生效表是用户确认后的。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **时间（timestep）** | **AGV1** | **AGV2** | **AGV3** | **AGV4** | **……** | **AGV50** |
| 0 | （3，3） | （6，3） | （1，9） |  |  |  |
| 1 | （3，4） | （6，4） | （2，9） |  |  |  |
| 2 | （3，5） | （5，4） | （3，9） |  |  |  |
| 3 | （4，5） |  | （3，8） |  |  |  |
| 4 |  |  | （3，7） |  |  |  |
| 5 |  |  | （4，7） |  |  |  |
| 6 |  |  | （5，7） |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |  |  |

SELECT \* from ((select max(ts) as agv1 from `public.xc\_equipment` where dis\_voltage is not null) n,(select max(ts) as agv2 from `public.xc\_equipment` where dis\_current is not null) m)

【相同目标点规划】

某次规划如果存在目标点冲突，则先规划目标点不冲突的任务。对于存在冲突点而没有被规划的任务，由关联任务调度算法在不冲突任务规划好的路径作为约束，提供给原来没有规划的任务作为其动态约束，以得到新的路径。

这样会因为任务先后顺序对总体规划目标是否优化有很大影响，用户可以调顺序。因为目前这种调度算法是一旦规划的路径确定，后面新添加的规划任务总是避让前面规划好的任务，而不考虑原来是否能达到全局最优。

## 前端调试

前端所需要的地图文件来源：从Tile中导出csv文件，该csv文件是一个-1，0组成的csv标准格式文件，需要将-1替换为2，0保持不变（通道）。然后将该文件拷贝到前端可视化工程对应的地图文件夹中（ly-phaser3-examples\public\assets\tilemaps\csv\）。

MAPF算法输出的结果拷贝到https://github.com/lvyv/phaser3-examples.git工程启动的前端代码中：

（1）修改地图文件。

（2）修改修改显示尺寸。

（3）cbs\_solution=`来自算法的输出文件`。

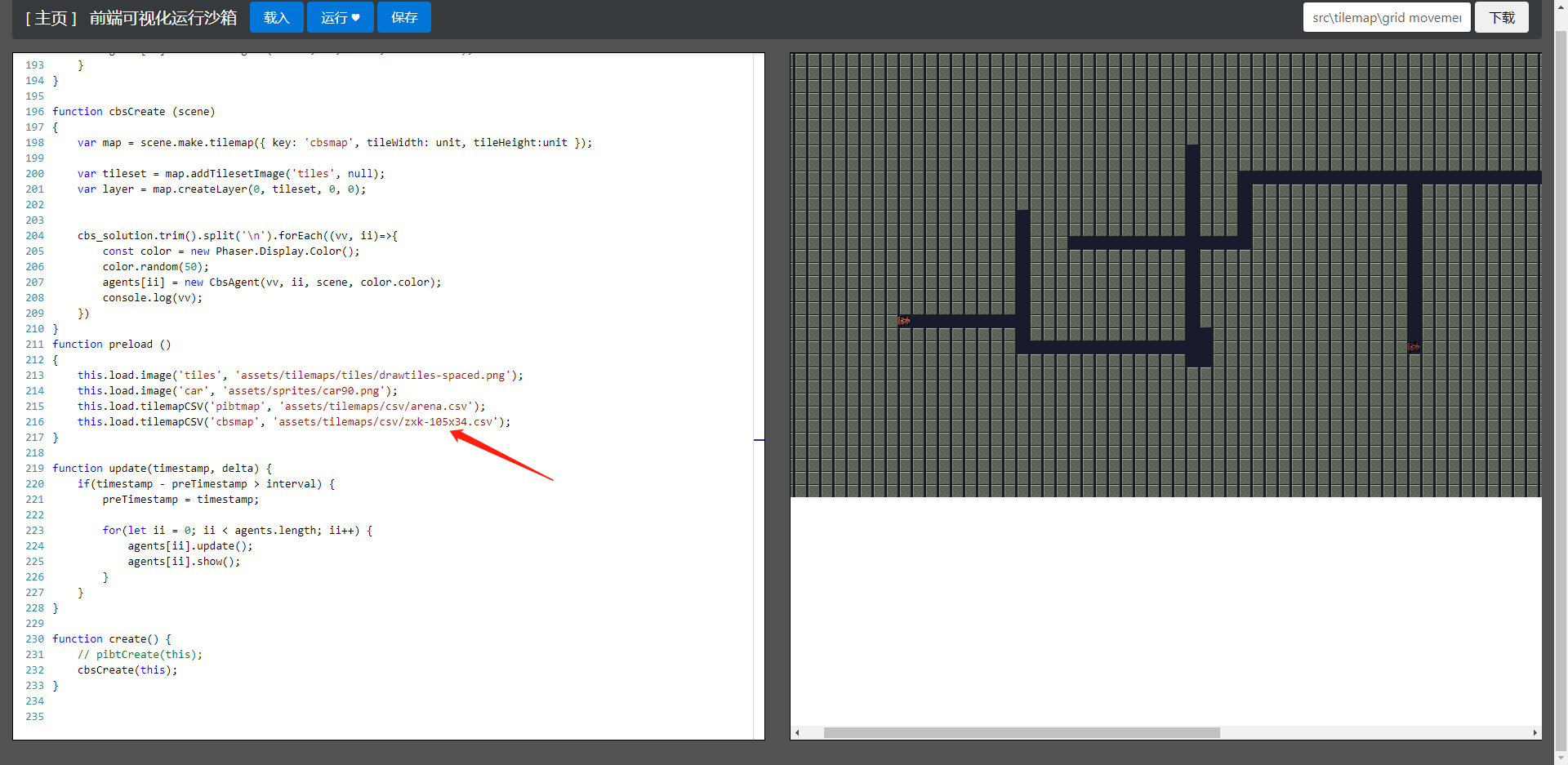


图 4-3 算法结果可视化——修改显示地图

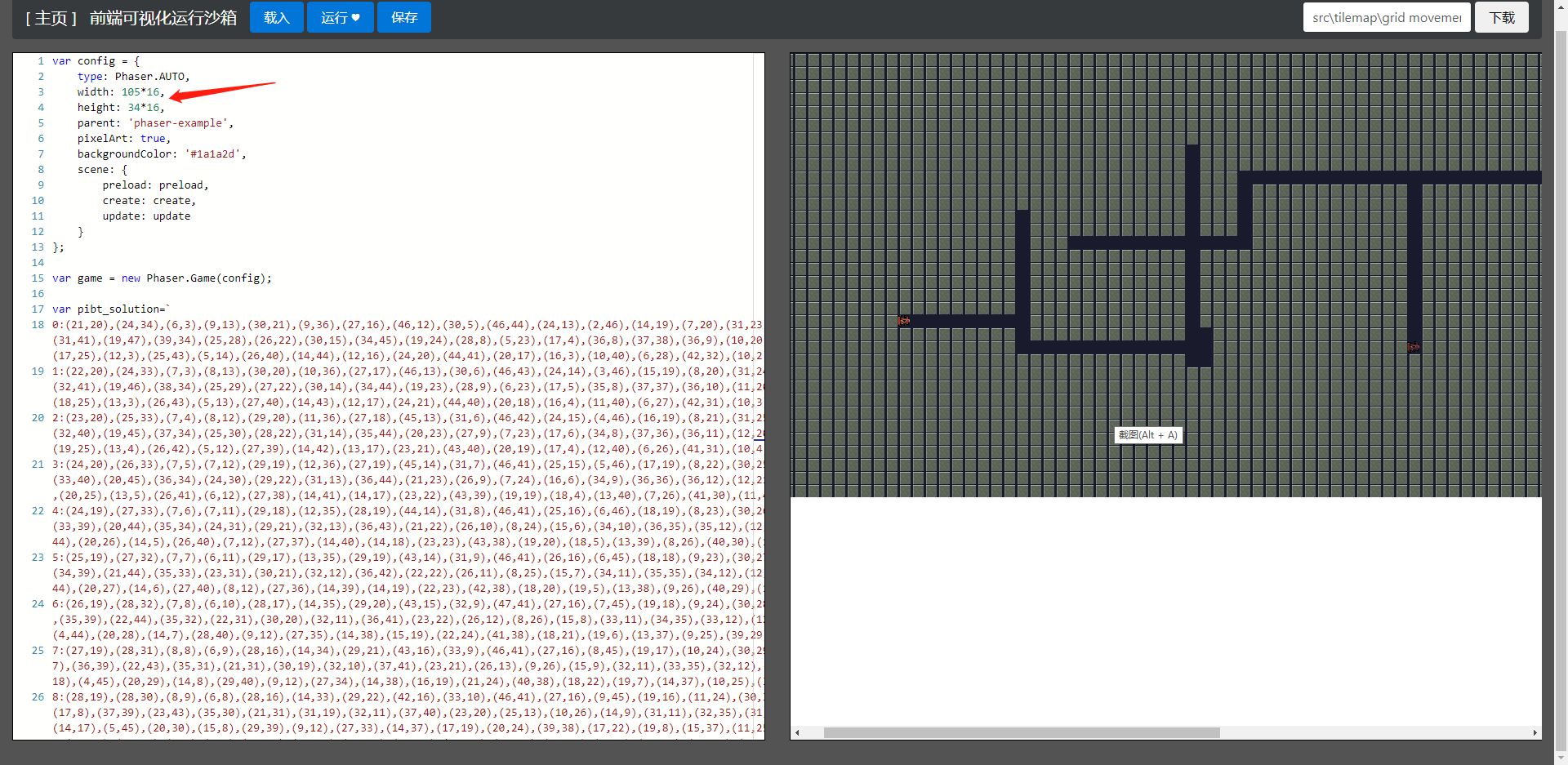


图 4-4 算法结果可视化——按地图修改显示尺寸

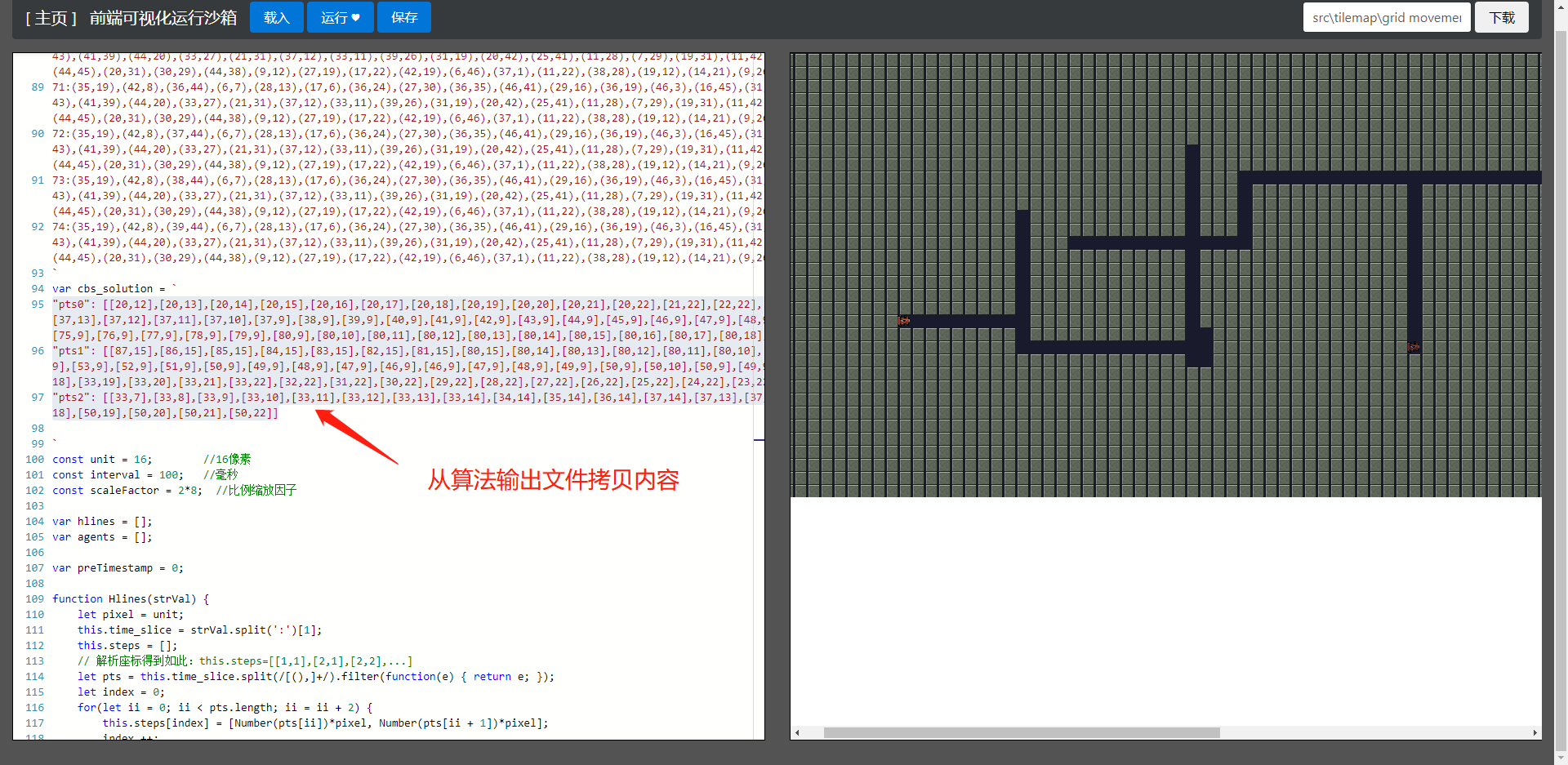


图 4-5 算法结果可视化——拷贝源于算法求解的路径

## 部署视图

MAPF算法软件可部署在Linux或Windows操作系统上，支持国产自主可控硬件服务器上运行。

部署的方式：采用docker部署。

tar zxvf mptools-mapf-scheduler.tar.gz

cd mptools-mapf-scheduler

sudo docker build -t cbs\_rt:v1 .

docker run -p 7080:7080 --name mapf\_scheduler cbs\_rt:v1

表 4-12 MAPF算法部署主机配置

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 部署内容 | 部署方式 | CPU | 内存 | 数据盘 | 所需端口 |
| 服务器 | Docker/K8S | 32核 | 64G | 2T | 18081 |

## 软件更新

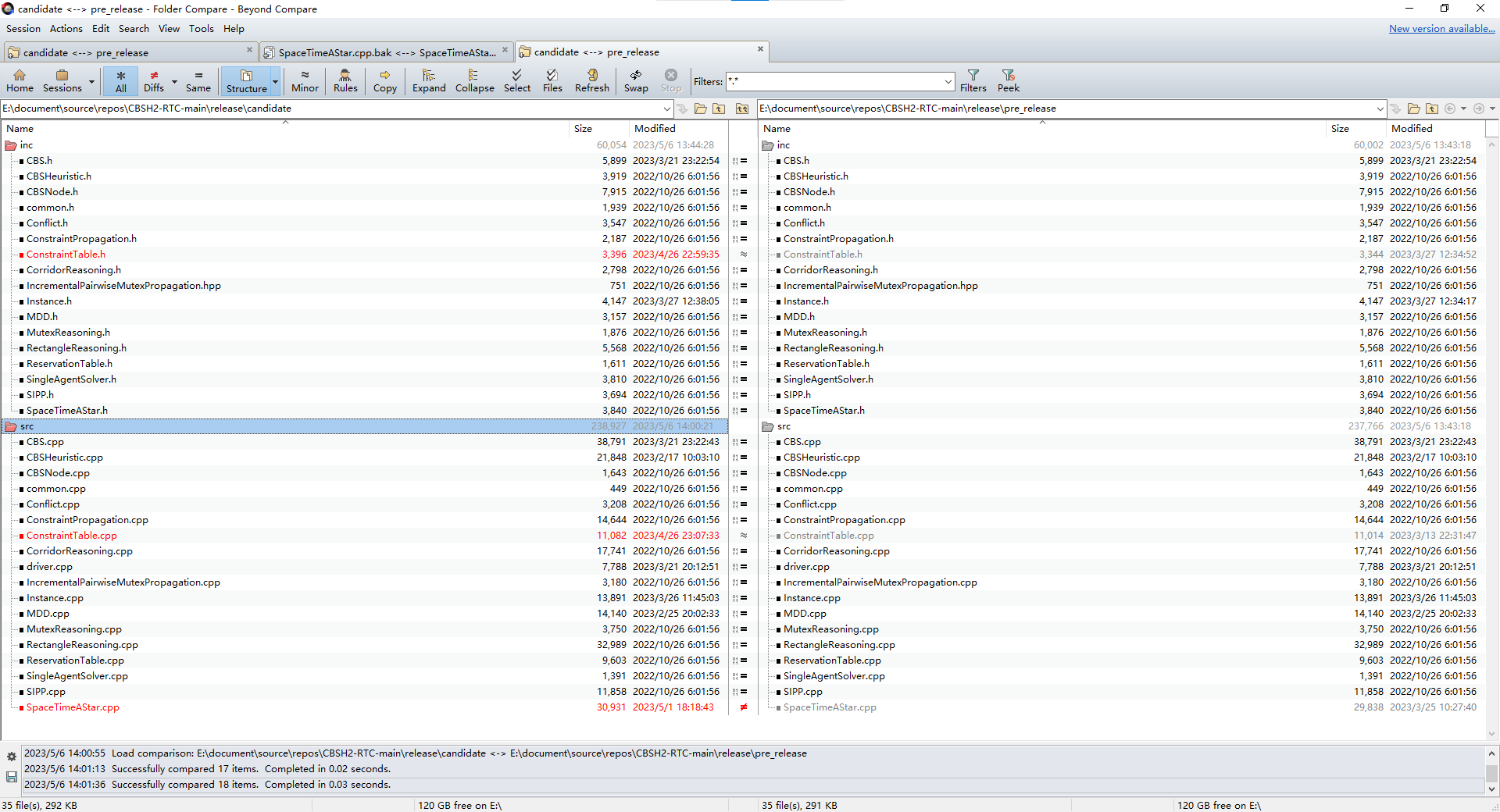
### 地图更新

地图更新请参考《地图制作说明》。

### 执行程序更新

（1）比较源码修改。

使用beyondCompare，比较windows下代码修改的部份。



（2）更新编译服务器上的源码。

（3）在ubuntu上编译。

在虚拟机ubuntu 18.04.5的windows的共享目录中的发布源码目录，直接编译。

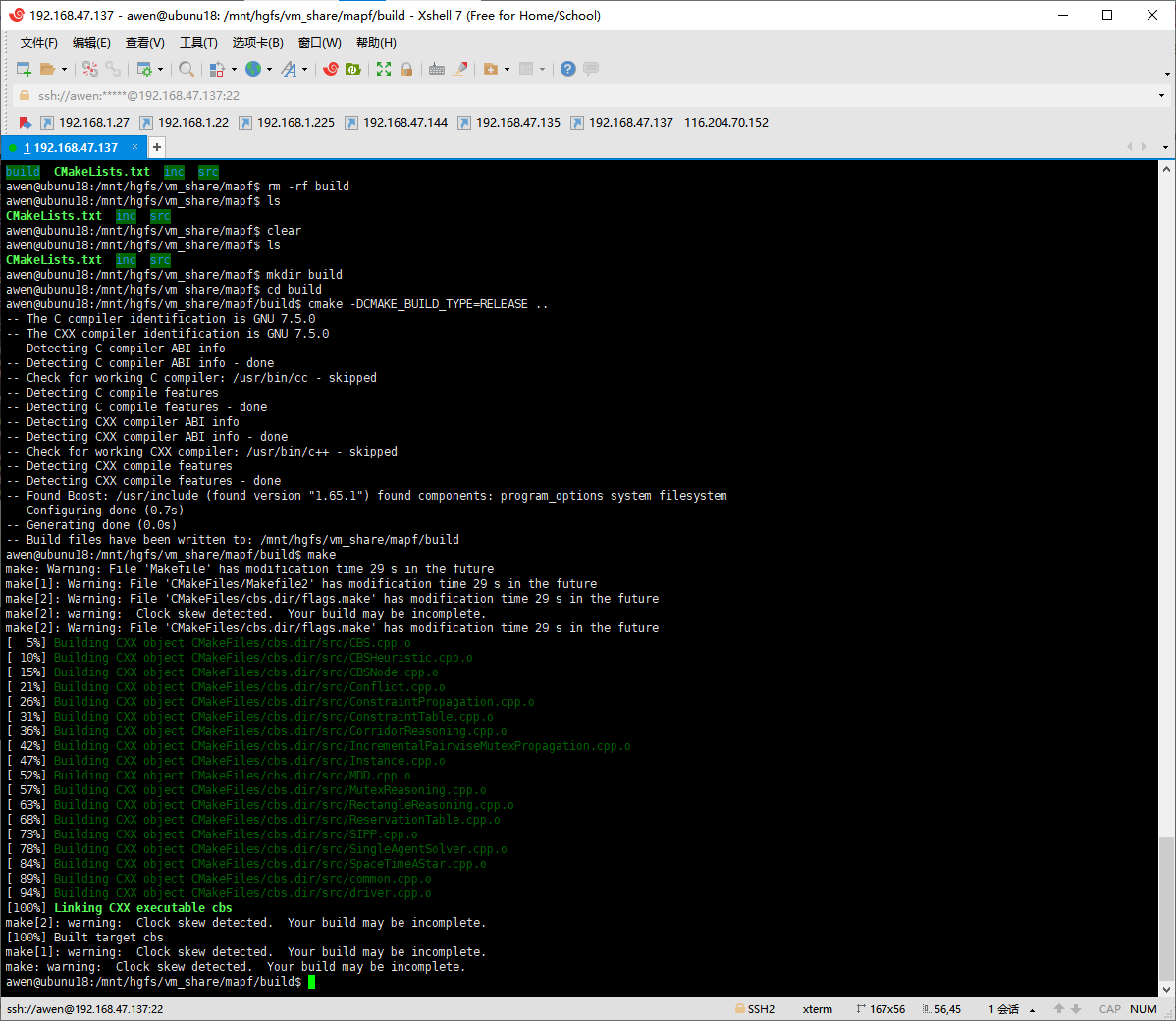
首先、具体过程是把源码目录下的inc/、src/和CMakeLists.txt拷贝到linux下的一个工程空目录，比如proj；然后进入proj目录，创建一个临时目录，比如build；进入build目录，运行如下命令，将在build目录完成编译。

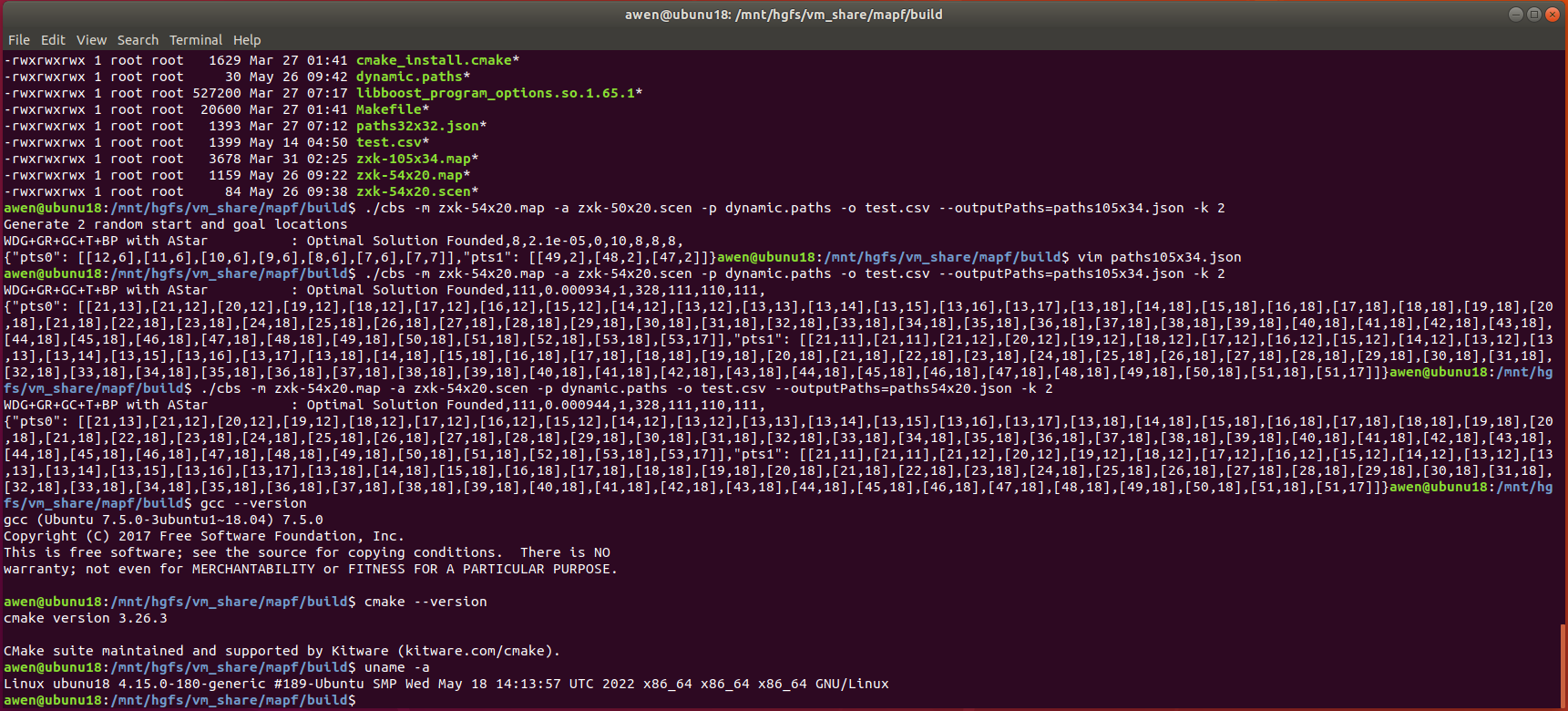
cmake -DCMAKE\_BUILD\_TYPE=RELEASE ..

make

需要注意，如果linux没有安装必须的gcc工具链，要记得安装。

sudo apt install libboost-all-dev





在虚拟机ubuntu 18.04.5的windows的共享目录中的发布源码目录，直接编译。

cd build

make

编译成功，目标文件为build目录下的cbs。

使用ldd cbs可以看到其依赖的动态链接库，只要拷贝boost的一个相关动态链接库即可，具体操作在Dockerfile中可以看到。

（4）测试。

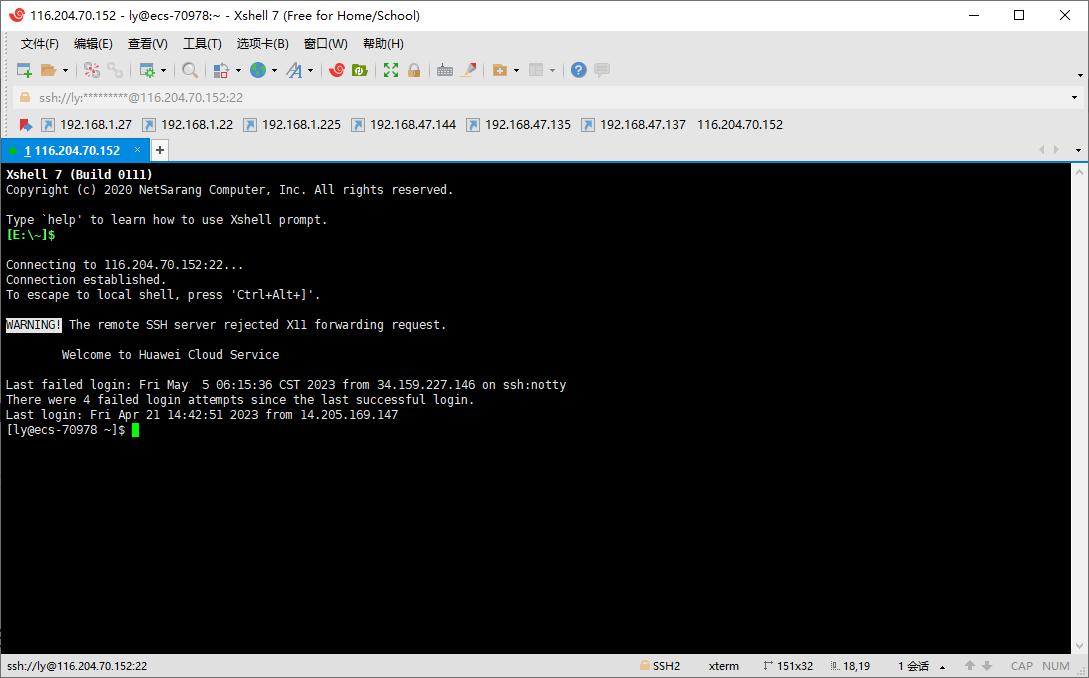
拷贝需要的map文件（地图文件），scen文件（任务文件）和paths文件（动态障碍），就可以完成如下的路径规划。

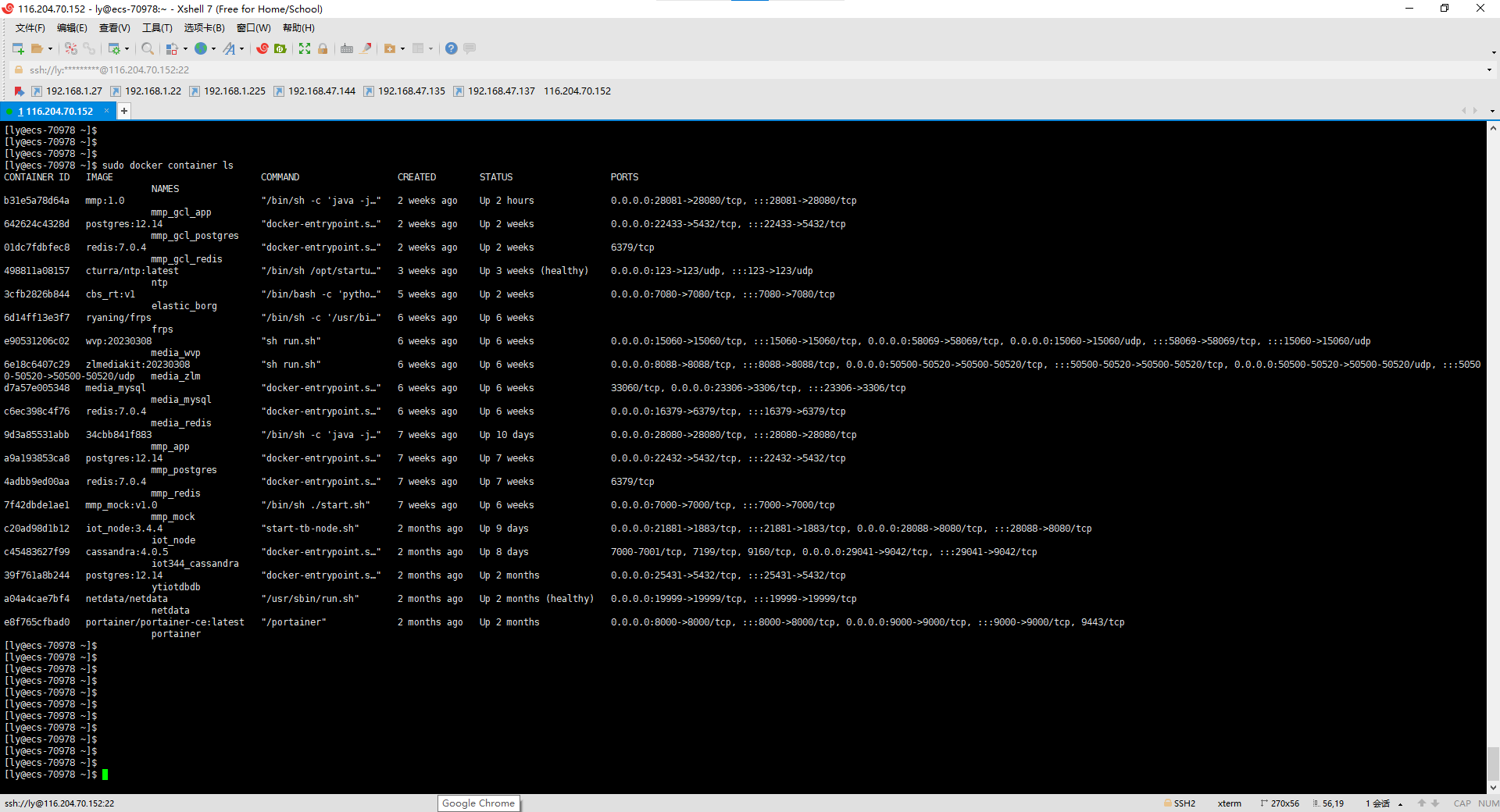
./cbs -m zxk-105x34.map -a bug\_zxk105x34\_2.scen -p bug\_dynamic2.paths -o test.csv --outputPaths=bug\_res\_2\_paths105x34.json -k 2

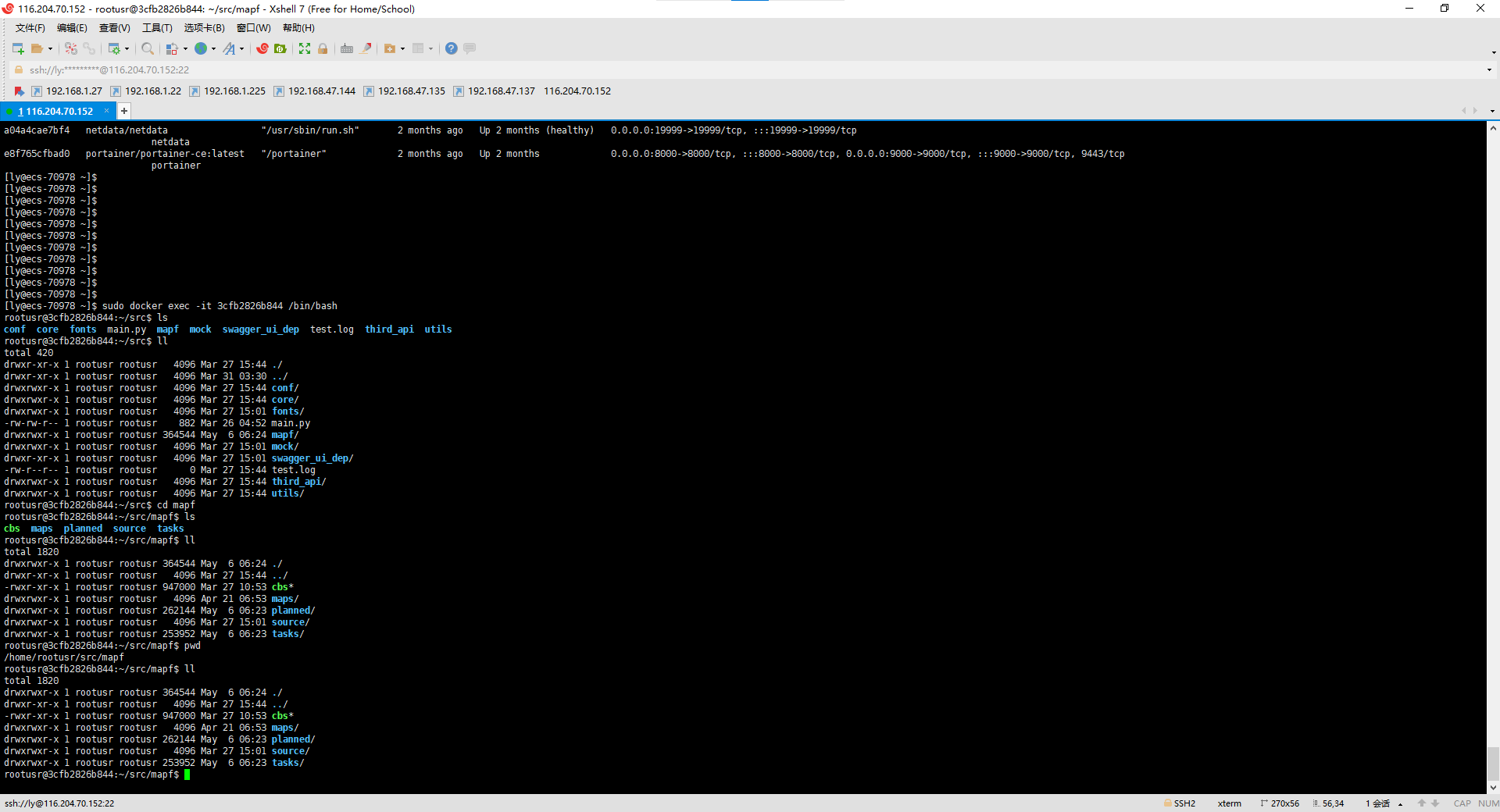
./cbs -m zxk-54x20.map -a zxk54x20.scen -p dynamic.paths -o test.csv --outputPaths=paths54x20.json -k 2

程序输出规划路径。

（5）发布和部署。







在容器内备份。

mv cbs cbs.bk

在容器外拷贝和测试。

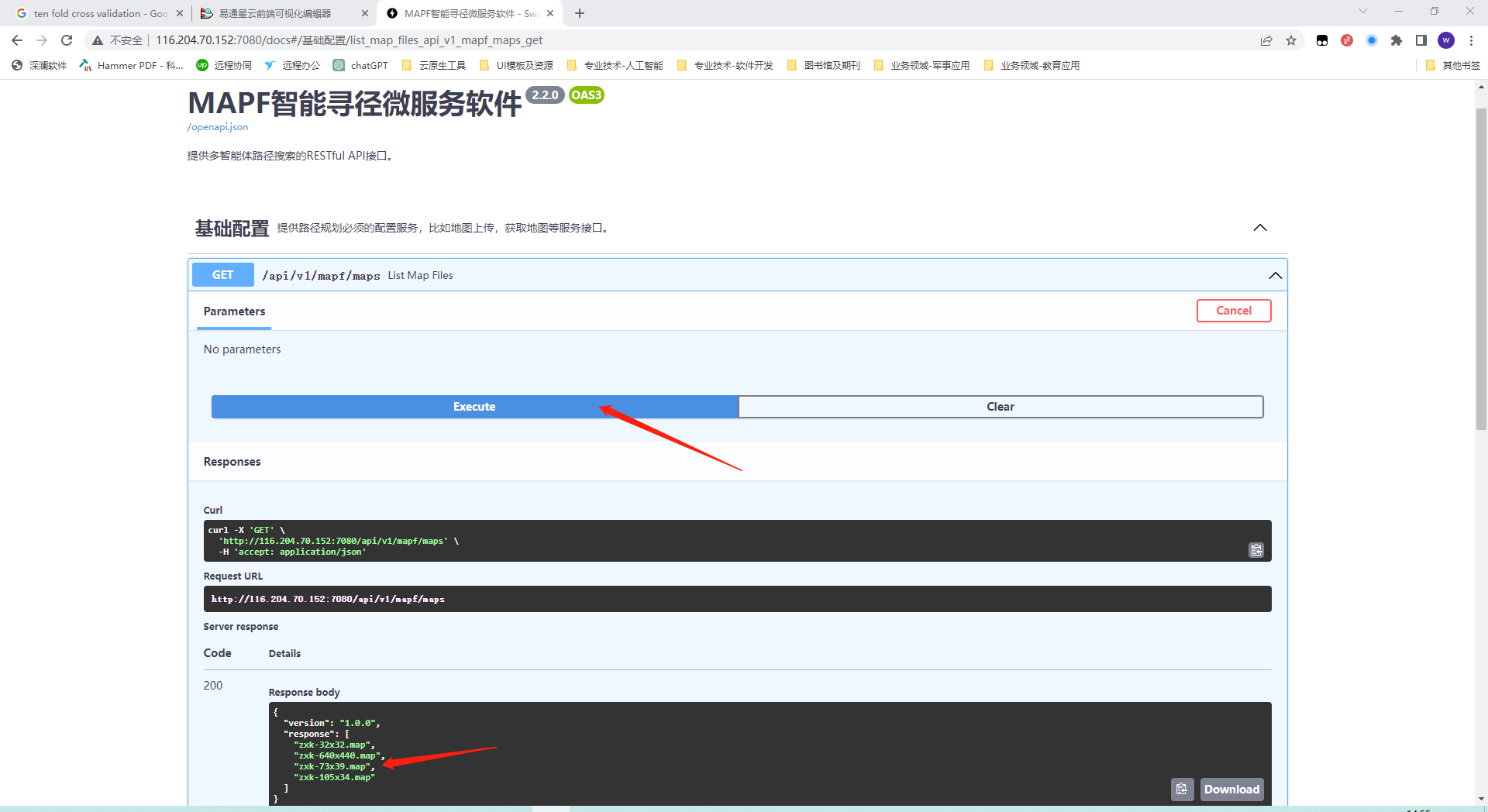
sudo docker cp cbs 3cfb2826b844:/home/rootusr/src/mapf/cbs

在容器内改变cbs为可执行属性

chmod 755 ./cbs

访问如下地址。

http://116.204.70.152:7080/docs



# 非功能设计

## 性能指标测试

采用地图集待定，原则为6000x4000尺寸像素地图，750x500图块范围进行路径搜索，单地图最大Agent支持50个。

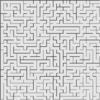
      

图 5-1 地图集设计

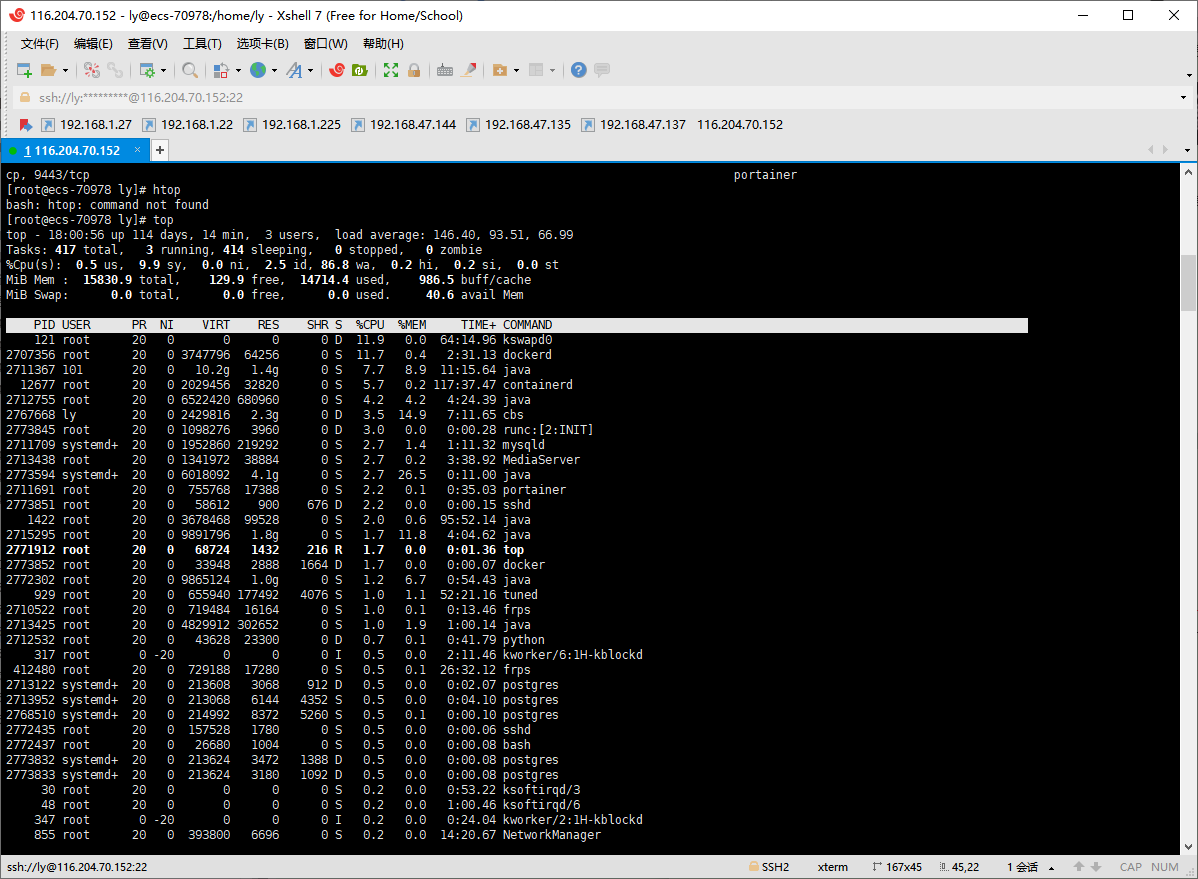
测试工具待定，测试环境暂定为CPU配置英特尔i5-7200U 2.50GHz，内存16GB。

## 扩展性

待定。

## 容器卡顿

在服务器上部署的cbs应用，使用一定时间，出现卡顿，docker ps等命令在命令行响应缓慢。使用top，查询发现某些进程cpu占用较高，尤其是内存极低。需要优化内存的使用。如下图，可用内存只有40M左右，buff/cache也不到1G。



## 设计约束

待定。

# 需求可追踪性

## 从软件需求规格到概要设计的追踪关系

表 6-1 从软件需求规格到二次细化设计的追踪关系

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 软件需求规格说明 | | 概要设计 | |
| 章节号 | 名称 | 章节号 | 名称 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

## 从软件概要设计到需求规格的追踪关系

表 6-2 从概要设计到软件需求规格的追踪关系

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 概要设计 | | 软件需求规格说明 | |
| 章节号 | 名称 | 章节号 | 名称 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |