

一种虚拟弧段式的停车场路网拓扑模型*

刘亚其, 于先文

东南大学交通学院, 江苏 南京 211102

摘要: 本文提出了一种虚拟弧段式的停车场路网拓扑模型。首先, 确定车位所在路段以及车位中心在该路段的投影点。然后, 以投影点两侧子路段的长度与该路段总长度的比值确认分割位置。对于每个车位, 使用分割位置截取路段的一部分作为虚拟弧段, 表达车位与路网之间的拓扑关系。最后, 在寻路时将路径规划任务分解为起点到车位所在路段两端点以及两端点到车位两个阶段, 选择综合代价更低的一条作为最终路径。实验表明: 相比于打断道路式模型, 本文模型在用于寻路计算时节省了 70% 以上的计算时间和 20% 的存储空间, 减少了 90% 以上的拓扑节点和边。因此, 该模型能有效减少寻路时间、降低拓扑路网维护工作量和数据存储传输压力。

关键词: 拓扑路网; 虚拟弧段; 停车场; 停车诱导

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)02-0086-08

Road network topology model of parking lot in the form of virtual arc

LIU Yaqi, YU Xianwen

School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211102, China

Abstract: This paper proposes a road network topology model of parking lot in the form of virtual arc. First, determine the road where the parking space is located and the projection point of the parking center on the road. Then, the segmentation position is confirmed by the ratio of the length of the sub-road on both sides of the projection point to the total length of the road. For each parking space, a part of the road is intercepted by the segmentation position as a virtual arc to express the topological relationship between the parking space and the road network. Finally, the path planning is divided into two stages: from the starting point to the endpoints of the road where the parking space is located, and from the endpoints to the parking space. The one with the lower comprehensive cost will be chosen as the final path. The experimental results show that the computational time is saved by more than 70%, the number of topological nodes and edges is reduced by more than 90%, the storage space is saved by 20%. It is proved that the model is of great significance to reduce the time of route finding, the workload of maintaining topological network and the pressure of data storage and transmission.

Key words: topology network; virtual arc; parking lot; parking guidance

随着我国私有车保有量的持续增长(中国统计, 2024), 大规模停车场在带来更多车位的同时, 也导致寻找车位的难度增加。基于停车场道路网络,

* 收稿日期: 2024-09-13 录用日期: 2024-10-07 网络首发日期: 2024-10-14

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3907103)

作者简介: 刘亚其(2000年生), 男; 研究方向: 组合导航, 交通空间信息感知;

E-mail: liuyaqi@seu.edu.cn

通信作者: 于先文(1974年生), 男; 研究方向: 组合导航, 交通空间信息感知;

E-mail: yuxianwen@seu.edu.cn

全文阅读



ZR20240282

为用户实时规划前往空余车位的最优路径, 对缩短停车时间, 提高停车场整体运行效率具有重要意义 (Dong et al., 2016; Wang et al., 2020; Gao et al., 2021)。

拓扑路网是路径规划任务的数据基础 (赵江洪等, 2020)。在停车场中, 虽然存在类似于城市道路的行车道, 但其实际功能是连接各个车位, 类似于连接房间的室内走廊。停车场中的车位, 在数量上远超一般室内环境的房间数, 但分布上又极其规律。并且, 不同于室内环境中房间-房间的行走路线, 停车场中几乎不存在车位-车位的起讫点情况。因此, 停车场路网需要在城市路网和室内路网的构建方案基础上进行优化。城市路网将路口抽象为节点, 道路抽象为连接节点的边, 将道路网络转化为一个有向图 (王世广等, 2018; Werner et al., 2000; Remolina et al., 2004)。针对路网构建过程中伪交叉口会增加路网复杂度的问题, 有学者利用主成分分析法分析车流方向强度, 识别伪交叉口并将其去除 (李思宇等, 2019)。针对有向图缺少转向信息的问题, 有学者提出一种新的路网模型记录路段之间的转向信息, 以规划更精确的路径 (周熙阳等, 2016)。

在室内路网构建方面, 开展的研究主要是平衡路网复杂度和行走习惯之间的矛盾。例如, 通过引入多边形正则化减少三角剖分生成路径时的不必要节点 (Lin et al., 2018)。利用语义信息和空间结构信息, 自动识别组成路网的关键节点, 以降低路网的复杂度 (Yang et al., 2015)。通过平面图取对偶形成导航边对象, 建立走廊路网节点和走廊抽象节点的满射关系, 细化走廊内部导航路网, 完成室内路网构建 (武恩超等, 2018) 等。此外, 详细网络对路径计算耗时的影响较大, 多尺度的分级路网则可以提高路径计算速度 (Teo et al., 2016)。

除拓扑地图外, 网格地图也常被用来表示环境并用于寻路 (Xu et al., 2016)。但网格地图虽能生成更加符合通行习惯的路径, 但是搜索效率较低。在面对大范围环境时, 此缺点更加明显。有学者结合二者的优点提出了网格拓扑叠加地图, 实现二者融合 (Zhou et al., 2020)。在地图形式选择上, 有学者依据空间属性分别使用拓扑网络和网格的形式构建路网, 通过映射点融合, 实现全局连续路径的快速生成 (陈维旺等, 2023)。

这些研究的核心思想均是将房间看作完全独

立的拓扑对象, 打断走廊等通道, 生成一个节点使房间和网络连通 (王行风等, 2021)。但是, 停车场中的停车位动辄上百个, 会导致完整道路被重复打断 (李灿, 2017), 增加大量的节点和边, 路网的拓扑复杂度急剧增高, 严重影响路径搜索效率 (张彩丽等, 2021)。此外, 现有研究利用各种传感器和机器学习算法, 实时估计停车场中道路的阻抗 (王致远, 2022)。然而, 重复打断完整道路也将使阻抗估计和更新的任务量成倍增加。

在实际寻路过程中, 除了目标车位对应的打断节点, 其他车位打断节点并不会影响路径的选择, 车辆只会在真正的道路节点和目标车位打断点改变路径方向, 无关车位的打断点均为最终路径上的“伪节点”, 对其进行的访问工作也均无效。针对无关车位节点影响寻路效率的问题, 本文提出了一种以虚拟弧段形式将车位接入拓扑网络的方案。这种方式可以避免道路被打断, 通过简化路网拓扑结构, 改善了寻路过程中无效访问节点过多的问题, 对提升寻路效率有重要作用。

1 虚拟弧段式路网模型

1.1 常见的停车场路网模型

停车场拓扑路网的主要要素包括基本道路和车位。其中, 基本道路结构简单, 对车位的处理方式是影响停车场拓扑路网复杂度的主要因素。现有模型在处理车位时, 通常将车位点直接加入拓扑路网中, 利用其在路段上的投影点将路段打断以连接车位和道路, 如图1所示。

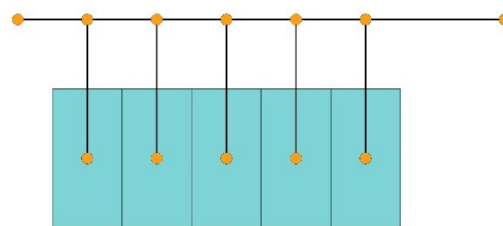


图1 打断道路式停车场路网模型

Fig. 1 Road-breaking network model for parking lot

在车位表中记录车位和对应拓扑节点的映射关系, 确认车位位置, 如表1所示。

该模型虽然简单, 但是一个车位需要向拓扑结构中加入车位节点和投影节点两个节点, 以及连接二者的边。同时, 投影节点将原本的单条路段打断为两条。因此, 拓扑结构的复杂度依然和车位数息息相关。此外, 在搜索到达目标车位的

表 1 打断道路式停车场路网模型车位表
Table 1 Parking information of road-breaking network model for parking lot

字段	类型	描述
id	整型	车位编号, 主键
roadVexID	整型	车位对应的拓扑节点 id

最短路径时, 对于非目标车位所在的路段, 仅有通过和不通过两种情况, 与其附属车位无任何关联; 对于目标车位所在路段, 也只需确定目标车位在路段中的位置, 即可得到最终的路径, 与该路段其他车位无关。打断道路式路网模型将车位视为完全独立的拓扑对象, 导致原本完整的道路在车位投影点处断开, 变成了多个拓扑边的集合。因此, 寻路过程中不可避免地对非目标车位相关节点进行大量无效搜索, 将严重影响寻路效率。

1.2 虚拟弧段式路网模型

针对打断道路式路网模型拓扑结构复杂的问题, 利用车位在路段两侧规律分布的特性, 本文提出了虚拟弧段式的停车场路网模型。该模型在构建拓扑路网时仅考虑完整道路, 暂时忽略车位的影响。在构建车位拓扑时, 首先计算其在路段上的投影点。然后不再做路段打断处理, 而是从投影点处做虚拟分割, 以两条虚拟子路段表达车位和路网之间的拓扑关系, 并以虚拟子路段的长度和路段总长度的比值确认分割位置。寻路时利用分割位置截取部分路段表示车位和路网的拓扑连接。

模型的拓扑结构如图 2 所示, 车位与所属道路的端点虚拟连接, 避免了道路的打断处理, 保持了道路的完整性。每一次寻路时, 由于车位和路网之间的拓扑信息都存储在车位表中, 因此无关车位并不会对寻路过程产生影响, 相当于仅构建

了当前车位和所有路段之间的拓扑关系, 对提升寻路效率有较大帮助。

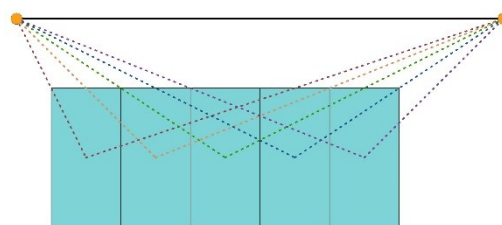


图 2 虚拟弧段式停车场路网模型

Fig. 2 Virtual arc network model for parking lot

假设某停车场中有 m 个节点、 n 条道路、 p 个车位。在打断道路式模型中, 2 个车位至少引入 2 个车位节点、1 个投影节点、2 条车位节点与投影节点之间的连接边, 也即至少存储 $(n+p)$ 条边、 $(m+1.5p)$ 个节点; 而虚拟弧段式模型仅需存储 n 条边、 m 个节点。除车位表外, 还需节点表和路段表一同记录拓扑信息。其中, 节点表中包含节点 id、节点坐标 x, y 和节点连接道路 id; 路段表包含路段 id、路段起点 fromVex、路段终点 toVex 和路段长 length。那么, 打断道路式模型和虚拟弧段式模型占用的字节估计量分别为 $20m+36n+82p$ 和 $20m+36n+56p$ 。因此, 在存储数据量和拓扑复杂度上虚拟弧段式模型都优于打断道路式模型。

本文模型的车位表如表 2 所示。将拓扑节点映射信息替换为车位所在路段信息后, 又增加了车位的中心坐标 (x, y) 、投影点坐标 $(proj_x, proj_y)$ 和分割位置 location。由于车位的拓扑信息仅通过分割位置截取的部分路段表示, 因此车位的数量、增减、移动都不会影响基本拓扑路网的结构。在车位发生变动时, 只需要修改对应车位表中记录的信息, 有助于减少维护拓扑路网的工作量。

表 2 虚拟弧段式停车场路网模型车位表

Table 2 Parking information of virtual arc network model for parking lot

字段	类型	描述
id	整型	车位编号, 主键
x	双精度浮点型	车位中心的 x 坐标
y	双精度浮点型	车位中心的 y 坐标
roadID	整型	车位所在路段 id
proj_x	双精度浮点型	车位中心投影至所在路段的 x 坐标
proj_y	双精度浮点型	车位中心投影至所在路段的 y 坐标
location	双精度浮点型	车位中心在路段投影点到该路段起点的距离与路段长度的比值

本文的虚拟弧段式路网模型如图3所示。首先, 根据停车场平面图提取路段中心和端点, 构建基本道路网络; 然后, 计算车位中心在其所属路段上的投影点, 获得车位在路段上的映射位置; 计算投影点分割路段的位置, 用于快速截取表示车位拓扑信息的虚拟弧段; 最后将投影点坐标和分割位置存入车位表, 完成车位的拓扑信息构建, 并与基本路网一同组成虚拟弧段式拓扑路网。

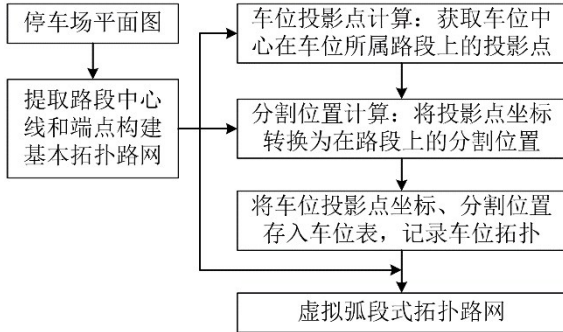


图3 虚拟弧段式停车场路网模型

Fig. 3 The virtual arc network model for parking lot

2 虚拟弧段式路网模型的实现

对于提取路段中心线和端点构建基本拓扑路网, 已有中轴线变换算法等(Fu et al., 2020; 胡炎等, 2017)。本文主要对提出的虚拟弧段构建中的投影点计算和分割位置确定进行论证, 并给出新路模型下寻路方法的调整方案。

2.1 车位投影点计算

停车行为分为停车场入口到目标车位入口, 以及从目标车位入口附近通过泊车进入车位两个过程。因此, 目标车位入口是通往车位路径上的必经点, 可以通过车位在路段上的投影点表示。

如图4(a)所示, 使用车位中心点代表车位, 以车位入口边为基准, 过车位中心P做其垂线, 垂

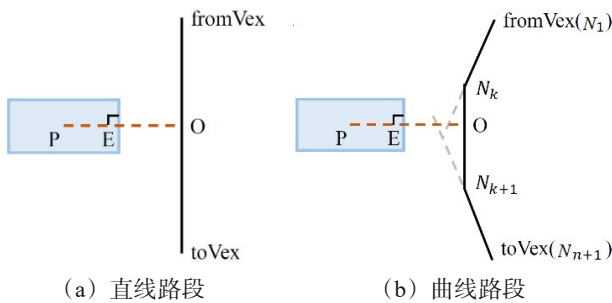


图4 投影点计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of projection point calculation

足为E, 延长后与路段中心线相交于一点O, O点即为车位在路段上的投影点。当车位所在道路是多条线段首尾连接的曲线道路时, 则需判断与PE延长线真正相交的部分, 如图4(b)所示。

利用直线的参数方程求解PE所在直线和路段的交点, 即投影点。

2.1.1 直线路段的求解 PE所在直线的参数方程为

$$\begin{cases} x(j) = x_p + j \times (x_e - x_p), \\ y(j) = y_p + j \times (y_e - y_p), \end{cases} \quad (1)$$

式中 (x_p, y_p) 、 (x_e, y_e) 为车位中心P、垂足E的坐标, j 为参数。

路段部分为线段时, 其参数方程为

$$\begin{cases} x(l) = x_f + l \times (x_t - x_f), \\ y(l) = y_f + l \times (y_t - y_f), \end{cases} \quad (2)$$

式中 (x_f, y_f) 、 (x_t, y_t) 分别为路段起点fromVex、终点toVex的坐标, 参数 $l \in [0, 1]$ 。

联立式(1)和(2)求得

$$l = \frac{(x_f - x_p) \cdot (y_e - y_p) - (y_f - y_p) \cdot (x_e - x_p)}{(x_f - x_t) \cdot (y_e - y_p) - (y_f - y_t) \cdot (x_e - x_p)},$$

代入式(2)得到投影点坐标

$$\begin{cases} \text{proj}_x = x_f + l \times (x_t - x_f), \\ \text{proj}_y = y_f + l \times (y_t - y_f). \end{cases}$$

2.1.2 曲线路段的求解 在曲线路段中, 需要确定车位投影点所在的具体线段。从路段起点开始, 遍历组成路段的所有线段 $N_i N_{i+1} (i=1, 2, \dots, n)$ 。线段参数方程为

$$\begin{cases} x(l_i) = x_i + l_i \times (x_{i+1} - x_i), \\ y(l_i) = y_i + l_i \times (y_{i+1} - y_i), \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x_i, y_i) 代表路段上节点 N_i 的坐标, $l_i \in [0, 1]$ 。

联立式(1)和式(3)求得

$$l_i = \frac{(x_i - x_p) \cdot (y_e - y_p) - (y_i - y_p) \cdot (x_e - x_p)}{(x_i - x_{i+1}) \cdot (y_e - y_p) - (y_i - y_{i+1}) \cdot (x_e - x_p)}.$$

当 l_i 不属于 $[0, 1]$ 时, 向后移动一个节点判断下一线段, 直至求得相交线段 $N_k N_{k+1}$ 。将 l_k 代入式(3)得投影点坐标

$$\begin{cases} \text{proj}_x = x_k + l_k \times (x_{k+1} - x_k), \\ \text{proj}_y = y_k + l_k \times (y_{k+1} - y_k). \end{cases}$$

2.2 分割位置计算

拓扑网络更加注重表达节点之间通过拓扑边相互连接的关系,而非节点的绝对位置信息。投影节点虚拟分割路段得到两个虚拟子路段,他们表达了车位和路网的拓扑关系。在一条线段上,通过一个长度比值即可确定线段上一个点的位置。因此,计算两条虚拟子路段的长度和路段总长度的比值,即可快速确认投影点分割路段的位置。

两条虚拟子路段的长度和路段总长度的比值之和为1,因此以投影点到路段起点这条虚拟子路段的长度比值表示分割位置 location ,投影点到路段终点这条子路段使用 $1 - \text{location}$ 即可。同样,根据车位所在路段是单条线段的直线路段还是多条线段首尾连接的曲线路段,投影点分割位置计算过程分别如图5(a)和图5(b)所示。

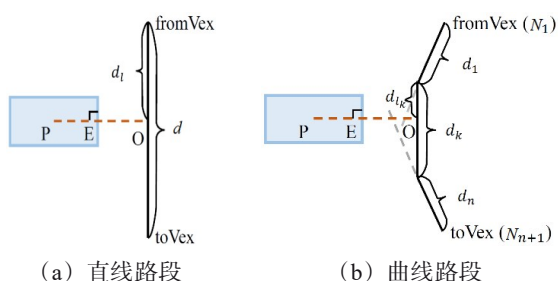


图5 分割位置计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of segmentation position calculation

在直线路段求解时,由参数方程的特点可知 l 即为投影点到路段起点的子路段长度与路段总长度的比值,因此参数 l 为分割位置 location 的值。

而对于曲线路段,参数 l_k 仅代表投影点对其所在线段的分割位置,而非对整条路段的分割位置。因此,需要重新计算投影点到路段起点的子路段长度,才能确认真正的分割位置。其表达式为

$$\begin{cases} \text{cost}(\text{fromVex}) = \text{cost}(\text{start}, \text{fromVex}) + \text{cost}(\text{fromVex}, \text{toVex}) \times \text{location}; \\ \text{cost}(\text{toVex}) = \text{cost}(\text{start}, \text{toVex}) + \text{cost}(\text{toVex}, \text{fromVex}) \times (1 - \text{location}). \end{cases}$$

判定

$$\text{Path} = \begin{cases} \text{Path}(\text{start}, \text{fromVex}) + [\text{fromVex}, (\text{proj}_x, \text{proj}_y)], & \text{cost}(\text{fromVex}) \leq \text{cost}(\text{toVex}); \\ \text{Path}(\text{start}, \text{toVex}) + [\text{toVex}, (\text{proj}_x, \text{proj}_y)], & \text{else}. \end{cases}$$

$$\text{location} = \left(l_k d_k + \sum_{i=1}^{k-1} d_i \right) / \sum_{i=1}^n d_i,$$

式中 d_i 代表线段 $N_i N_{i+1}$ 的长度, k 为交点所在路段序号, n 为曲线路段的总线段数。

2.3 节点-路段式寻路方法

因本文模型中的车位不再是拓扑节点,因此需要对寻路方法做针对性调整。使用节点-路段的起讫方式代替节点-节点进行路径搜索,并将最短路径划分为两个阶段:起点-路段两 endpoints、路段两 endpoints-车位。规划完成后将得到两条最短路径,分别经过车位所在路段的起点和终点,选择综合代价更小的一条作为最终路径。由于选择路段是车位所属路段,其端点就是到达车位的必经节点,因此两阶段式寻路并不会影响最终路径的最优性。

如图6所示,在寻路第一阶段,搜索起点到车位所属路段两 endpoints 的路径,此时退出寻路过程的条件为两个 endpoints 都找到了最短路径,分别为 $\text{Path}(\text{start}, \text{fromVex})$ 、 $\text{Path}(\text{start}, \text{toVex})$, 对应的通行代价为 $\text{cost}(\text{start}, \text{fromVex})$ 、 $\text{cost}(\text{start}, \text{toVex})$ 。第二阶段搜索两 endpoints 到车位的的路径,根据车位投影点坐标 $(\text{proj}_x, \text{proj}_y)$, 得到两条路径分别为 $[\text{fromVex}, (\text{proj}_x, \text{proj}_y)]$ 、 $[\text{toVex}, (\text{proj}_x, \text{proj}_y)]$, 对应的通行代价为 $\text{cost}(\text{fromVex}, \text{toVex}) \times \text{location}$ 和 $\text{cost}(\text{toVex}, \text{fromVex}) \times (1 - \text{location})$ 。

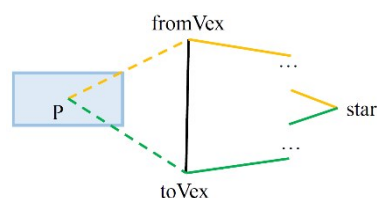


图6 新路网下的寻路示意图

Fig. 6 The way finding method used to the new road network

经过路段起点 fromVex 和路段终点 toVex 的两条路径的总代价为

即得到综合代价最小的路径作为最终路径。

3 实验验证

为验证本文模型的性能, 对打断道路式路网模型和虚拟弧段式路网模型的占用存储空间、路

网拓扑复杂度和相同起讫点下的寻路效率等指标进行对比。图 7 为停车场地图示例, 该停车场共有 11 条道路, 其中一条主路连接出入口和通往车位的 10 条支路, 共计 103 个停车位。

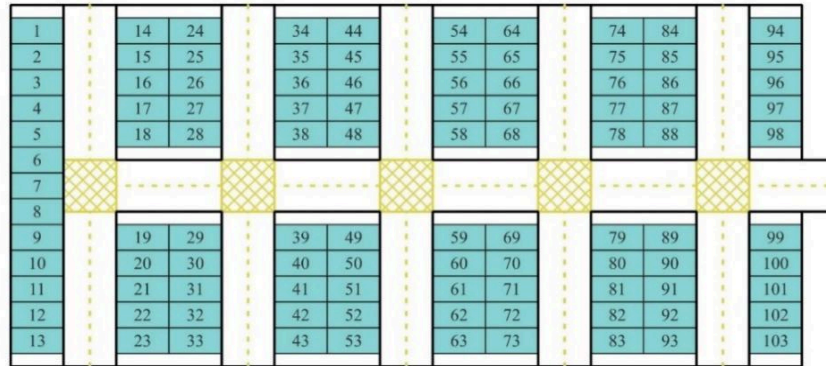


图 7 停车场平面图

Fig. 7 Parking lot plan

3.1 占用存储空间

利用更小的空间存储相同的信息可以缓解数据库存储压力, 也可以减少数据传输过程的压力。本实验中停车场的拓扑路网使用边表 Roads、节点表 RoadVexs 和车位表 ParkVexs 表达, 两种路网构建方法下各表所占磁盘空间如表 3 所示。

表 3 数据表占用磁盘空间

项目	Roads	RoadVexs	ParkVexs	总计
打断道路式	16	16	8	40
虚拟弧段式	8	8	16	32

本文模型在边表和节点表上都节约了更多的空间, 而车位表记录了更多的信息, 因此其车位表的存储量大于打断道路式路网, 但是从总计来看, 本文模型仍然减少了 20% 的磁盘空间占用。

3.2 拓扑复杂度

拓扑节点数和拓扑边数是体现拓扑复杂度的重要指标, 两种模型的统计结果如表 4 所示。打断道路式路网在基本道路网的基础上, 每加入一个车位, 都需要添加新的节点和边, 并且有可能打断原有的拓扑边, 最终的拓扑复杂度与车位的数量和分布息息相关。本文模型的拓扑复杂度则与车位无关, 只受停车场基本道路几何结构的影响, 最终边数和节点数分别减少了 91.2%, 90.6%。

表 4 拓扑结构复杂度

Table 4 Complexity of the topology

项目	拓扑节点数	拓扑边数
打断道路式	171	170
虚拟弧段式	16	15

3.3 寻路效率

寻路效率可以从寻路过程中访问的节点数和寻路耗时两个方面体现。本次实验使用常见的 A* 算法和 Dijkstra 算法进行寻路, 对某车位进行路径规划后, 两种路网模型下的访问节点数如表 5 所示。

表 5 访问节点数

Table 5 Number of nodes accessed during pathfinding

项目	访问节点数(A*)	访问节点数(Dijkstra)
打断道路式	115	168
虚拟弧段式	16	16

结合表 4 可知, 本文模型中全部的拓扑节点均被访问, 但是这个数量仍然是远低于打断道路式路网的, 在 A* 算法、Dijkstra 算法中访问节点数分别仅有传统路网的 13.9%、9.5%。如图 8 所示, 以 A* 算法为例展示在两类拓路网中访问节点的分布, 图中红色节点为访问节点。

由图 8(a) 和图 8(b) 可知, 将打断道路式路网用于寻路时, 在无关车位的相关节点中进行了大

量的无效访问, 加入了启发函数的 A* 算法对此情况的改善也非常有限。但无关车位对于本文模型等效于不存在, 将本文模型用于寻路时, 只会访问各路段的端点, 此路段上有无车位, 有多少车位都不会影响搜寻效率。

为了避免不同类型 OD 以及偶然误差对寻路耗时的影响, 固定起点为停车场入口, 然后选择 10 个不同的车位作为终点, 如图 9 所示。使用 A* 算法和 Dijkstra 算法进行 1 000 次重复寻路实验, 记录搜索路径的耗时情况, 如表 6 所示。

将本文模型用于寻路时, 访问节点数大幅减少, 因此在两种算法下寻路所需的时间也都随之

减少, A* 算法和 Dijkstra 算法的寻路耗时分别减少了 77.8%, 74.1%。可见, 虽然本文模型在寻路时增加了两条路径择优的判断, 但对计算量的影响较小。在车位远离起点时, 打断道路式路网模型寻路耗时急剧增加, 而虚拟弧段式模型寻路耗时变化较为收敛。主要原因在于, 到达远离起点的车位, 需要经过的节点可能更多, 与这些节点相关联路段上的车位节点将会被访问。而, 本文模型抑制了寻路过程中无关车位的影响。因此, 对于越远离起点的车位, 规划效率的提升效果也越明显; 对于靠近起点车位, 规划速度也基本相当。

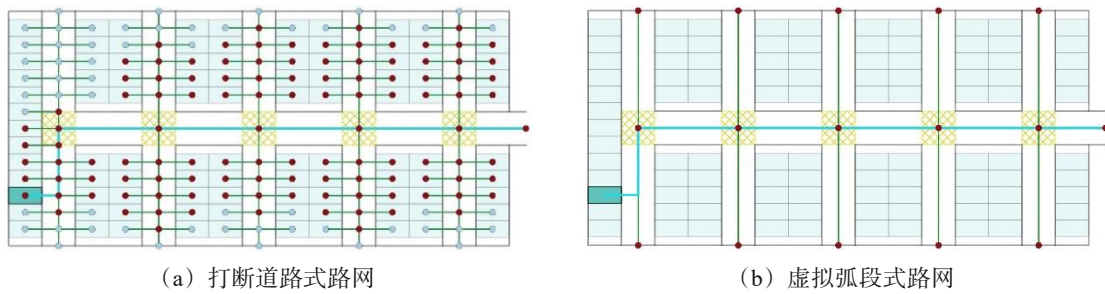


图 8 A* 算法寻路中访问节点分布图

Fig. 8 Distribution map of node accessed when using A* algorithm

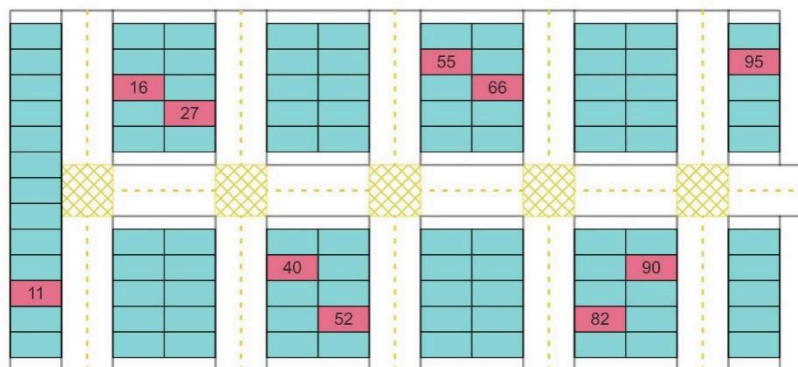


图 9 10 个目标车位分布图

Fig. 9 Distribution map of 10 target parking spaces

表 6 搜索路径耗时

Table 6 Time spent searching path

项目		11	16	27	40	55	52	66	82	95	90	总计
A*	打断道路式	357	309	172	302	276	198	90	72	46	18	1 840
	虚拟弧段式	49	40	31	69	48	48	52	31	16	24	408
Dijkstra	打断道路式	251	281	204	376	224	162	178	111	57	39	1 783
	虚拟弧段式	48	51	47	61	54	41	54	31	36	39	462

4 总 结

针对打断道路式停车场路网模型拓扑结构复杂,应用于寻路时存在大量无效访问节点、寻路效率低下的问题,利用车位规律分布于道路两侧的特点,提出了一种虚拟弧段式的路网拓扑模型。本文模型通过记录车位投影点在路段上的分割位置,截取路段的一部分表达车位和路网之间的拓

扑连接关系,减少了拓扑结构的节点数和边数、简化了拓扑结构,提高了寻路效率。实例证明本文提出的路网模型具有三个优点:应用于寻路时访问节点更少,计算耗时少;拓扑结构复杂度更低,拓扑维护工作量小;占用存储空间更小。这说明其对提升寻路效率、减少拓扑路网维护工作量和缓解数据存储传输压力具有重要的意义。

参考文献:

- 陈维旺,朱正亮,陈钦佩,等,2023.用于室内消防救援的融合路网构建方法研究[J].消防科学与技术,42(5):689-694.
- 胡炎,王萍,2017.优化的离散 λ -中轴骨架提取算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,29(8):1505-1514.
- 李灿,2017.面向停车诱导的室内地图模型构建与应用[D].武汉:武汉大学.
- 李思宇,向隆刚,张彩丽,等,2019.基于低频出租车轨迹的城市路网交叉口提取研究[J].地球信息科学学报,21(12):1845-1854.
- 王世广,于德新,王树兴,等,2018.基于改进度的城市路网元素连接特性[J].交通运输工程学报,18(2):101-110.
- 王行风,刘俊生,2021.面向室内导航的分层认知路网优化方法[J].地球信息科学学报,23(9):1586-1597.
- 王致远,2022.大型停车场内寻车辆的优化管控方法研究[D].南京:东南大学.
- 武恩超,张恒才,吴升,2018.基于中轴变换算法的室内外一体化导航路网自动生成方法[J].地球信息科学学报,20(6):730-737.
- 尹言军,黄中和,肖琨,等,2024.智慧城市道路内停车位现状与布设潜力分析——以武汉市江汉区为例[J].测绘通报,(S1):201-203.
- 张彩丽,向隆刚,李雅丽,等,2021.基于出租车轨迹的可导航路网构建[J].测绘学报,50(12):1650-1662.
- 赵江洪,董岩,危双丰,等,2020.室内导航路网提取研究进展[J].测绘科学,45(12):45-54+76.
- 中国统计,2024.中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[J].中国统计,(3):4-21.
- 周熙阳,杨兆升,张伟,等,2016.考虑信号交叉口转向类型的最优路径规划算法[J].华南理工大学学报(自然科学版),44(4):101-108.
- DONG N, FANG X, WU A G, 2016. A novel chaotic particle swarm optimization algorithm for parking space guidance [J]. Math Probl Eng, 2016(1): 5126808.
- FU M, LIU R, QI B, et al, 2020. Generating straight skeleton-based navigation networks with industry foundation classes for indoor way-finding [J]. Automat Constr, 112: 103057.
- GAO H, YUN Q, RAN R, et al, 2021. Smartphone-based parking guidance algorithm and implementation [J]. J Intell Transp Syst, 25(4): 412-422.
- LIN W Y, LIN P H, 2018. Intelligent generation of indoor topology (I-Git) for human indoor pathfinding based on IFC models and 3D GIS technology [J]. Automat Constr, 94: 340-359.
- REMOLINA E, KUIPERS B, 2004. Towards a general theory of topological maps [J]. Artificial Intelligence, 152(1): 47-104.
- TEO T, CHO K, 2016. BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning [J]. Adv Eng Inform, 30(3): 268-282.
- WANG X, SHI H, ZHANG C, 2020. Path planning for intelligent parking system based on improved ant colony optimization [J]. IEEE Access, 8: 65267-65273.
- WERNER S, KRIEG-BRÜCKER B, HERRMANN T, 2000. Modelling navigational knowledge by route graphs [J]. Spatial Cognition II, 1849: 295-316.
- XU M, HIJAZI I, MEBARKI A, et al, 2016. Indoor guided evacuation: TIN for graph generation and crowd evacuation [J]. Geomat, Nat Haz Risk, 7(S1): 47-56.
- YANG L, WORBOYS M, 2015. Generation of navigation graphs for indoor space [J]. Int J Geog Inform Sci, 29(10): 1737-1756.
- ZHOU X, XIE Q, GUO M, et al, 2020. Accurate and efficient indoor pathfinding based on building information modeling data [J]. IEEE Trans Industr Inform, 16(12): 7459-7468.