面向智能网联汽车的停车场车位引导方法研究*

陈野　王舜耕　崔祺瑞

（湖州师范学院，湖州 313000）

【摘要】针对静态路径规划方法在地下停车场车位引导中难以响应动态交通状况，易引起局部拥堵的问题，提出一种面向智能网联汽车（ICV）的停车场车位引导方法。该方法充分利用车联网（V2X）通信技术实时获取车位状态与车流信息，基于时间窗模型预测车辆行驶过程中的潜在时空冲突，并依据预设的优先级规则协调车辆通行。为解决冲突引发的拥堵问题，将预估的冲突等待时间量化为受影响路段的动态边权增量。在此基础上，融合D*Lite算法进行路径重规划，以优化车辆的引导路径。基于真实停车场结构建模的仿真测试结果表明，相较于传统方法，所提出的方法在不同场内饱和度条件下均显著降低了车辆的平均寻泊用时，有效提升了停车场的整体停车效率。

关键词：智能网联汽车　路径规划　D*Lite算法　时间窗模型　车联网

中图分类号：U491.7　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260002

Research on Parking Space Guidance Methods for Intelligent Connected Vehicle

Chen Ye, Wang Shungeng, Cui Qirui

(Huzhou University, Huzhou 313000)

【Abstract】To address the issue that static path planning methods struggle to respond to dynamic traffic conditiond and easily cause local congestion in underground parking lot guifance, this paper proposes a parking space guidance method tailored for Intelligent Connected Vehicles (ICV). The proposed method leverages Vehicle-to-Everything (V2X) communication technology to acquire real-time information on parking space availability and traffic flow. It employs a time window model to predict potential spatiotemporal conflicts during vehicle movement and coordinates vehicle passage according to predefined priority rules. To mitigate congestion arising from these conflicts, the estimated waiting time due to conflicts is quantified as a dynamic increment to the edge weights of the affected road sections. On this basis, the D*Lite algorithm is integrated to perform path re-planning, achieving spatiotemporal cooperative optimization. Based on a model replicating a real parking structure, Simulation tests demonstrate that compared to traditional methods, the proposed approach significantly reduces the average parking search time across various scenarios with different occupancy levels within the facility, thereby effectively enhancing the overall parking efficiency.

Key words: Intelligent Connected Vehicle (ICV), Path planning, D*Lite algorithm, Time window model, Vehicle-to-Everything (V2X)

【引用格式】陈野，王舜耕，崔祺瑞. 面向智能网联汽车的停车场车位引导方法研究[J]. 汽车工程师，2026(7)：36-43.

CHEN Y, WANG S G, CUI Q R. Research on Parking Space Guidance Methods for Intelligent Connected Vehicle[J]. Automotive Engineer, 2026(7): 36-43.

1　前言

大型地下停车场内部布局复杂且缺少有效指引[1-2]，高峰时间段驾驶员寻找车位较为困难。目前，一些停车场通过架设车位引导屏进行引导[3]，但未能考虑停车场各路段实时车流量、停车引起的车道占用等动态影响因素，易造成局部拥堵。因此，结合停车场动态影响因素，高效地提供停车引导服

*基金项目：浙江省自然科学基金基础公益研究计划项目（LTGS24F030001）；湖州市公益性应用研究项目（2023GZ26）。

务是目前亟待解决的问题。

在停车路径规划领域，当前研究主要聚焦于两个优化方向：一是通过对传统路径规划算法的改进与融合提升算法在复杂停车环境中的适应性；二是引入机器学习方法优化路径状态的量化表征与决策过程[4]。Ge[5]提出了一种基于改进迪杰斯特拉（Dijkstra）算法的停车场最优路径规划方法，将Dijkstra算法与阻抗函数模型相结合，使用综合考虑行驶距离与行驶时间的函数进行权重矩阵计算。Kim等[6]提出了目标树快速探索随机树（TargetTree-RRT*）算法应用于停车场泊车场景，能够高效计算出从当前位置到达停车位的最优路径，满足停车场景下快速路径规划的需求。Qin等[7]提出了一种基于方向图搜索和几何曲线的停车路径规划方法，采用改进的混合A*（Hybrid A*）算法进行全局路径规划，并结合改进C型垂直停车路径规划算法优化泊车控制，在计算效率和实际应用性等方面均展现出显著优势。Zhang等[8]提出了一种基于强化学习的停车路径规划方法，通过奖励函数对停车数据进行评估并利用神经网络进行停车策略学习，有效提高了停车效率。Tang等[9]使用柔性演员-评论家（Soft Actor-Critic，SAC）分段停车训练框架帮助自动驾驶电动汽车（Automatic Ego Vehicle，AEV）学习停车策略，有效提高了车辆在非理想场景下的停车成功率。Chai等[10]使用深度神经网络进行停车轨迹规划与控制，为车辆提供到达车位的最优路径。

综上，虽然现有研究在停车路径规划领域已取得显著进展，但研究多集中于静态环境下的路径规划，对停车场内车辆等因素产生的动态影响考虑不足，特别是在高峰时段多车同时寻泊的场景下，现有研究普遍缺乏有效的协同规划机制。此外，基于机器学习的方法存在训练数据需求大、奖励函数依赖领域先验知识等问题，导致算法性能不稳定。本文基于车联网（Vehicle-to-Everything，V2X）通信技术对车辆未来行驶过程的冲突状况进行预测和处理，将冲突造成的动态影响进行量化，更新拥堵路段的边权，供路径规划算法进一步处理，同时提出一种融合时间窗约束与D*Lite算法的优化引导方法，通过高效消解车辆间的行驶冲突提升停车效率。

2 问题假设与算法基础

2.1 假设条件

本文基于以下假设：

a. 停车场配备相应的传感器和信息系统，能够实时获取和处理车辆信息、停车位状态信息、停车场内部拓扑信息和停车场内流动车辆的实时位置信息。其中，车位状态信息可以通过地磁传感器[11]、红外线传感器[12]等方式采集，车辆信息和停车场内流动车辆的实时位置可以通过摄像头辅以相应的车牌识别技术和室内定位技术获取[13]。

b. 停车场内的寻泊车辆均为智能网联车辆（Intelligent Connected Vehicle，ICV），可通过V2X通信模块实时上报位置、速度及行驶意图，为时间窗的动态计算与冲突预判提供实时数据支持，系统依据这些信息向ICV下发路径指令。

c. 停车场网络覆盖良好，能够保证车位引导算法的正常运行以及网联汽车与停车场系统的实时交互。

2.2 D*Lite算法

D*Lite算法是一种动态路径规划算法，继承了基于启发式搜索的核心思想，并引入了反向搜索机制和增量式更新策略，可以通过初始规划路径的节点信息来提高路径重新规划的效率[14-15]。

D*Lite算法通过计算和更新从每个节点到目的地的实际最低成本值$g(s)$实现路径规划。该算法需要处理因地图环境动态变化而导致的节点$g(s)$的变化，故引入了估计的最低成本值$r(s)$。在路径更新过程中，节点的$r(s)$首先更新，如果$r(s)<g(s)$，则将其分配给$g(s)$。$g(s)$和$r(s)$的计算公式为：

$$g(s)=r(s)=\begin{cases}0, & s=s_{\text{goal}}\\ \min\limits_{s'\in S(s)}\left(g(s')+c(s,s')\right), & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$S(s)$为当前节点s的所有后继节点，s为当前节点，$c(s,s')$为从当前节点到后继节点s'的成本值，$g(s')$为从后继节点s'到达目标节点的成本值，s_{goal}为目标节点。

为提高路径规划的效率，D*Lite算法通过优先队列U管理节点处理顺序，将节点键值$\boldsymbol{k}(s)$从小到大排序，排序靠前的键为最佳路径节点的概率较高，从而优先考虑其更新。键值排列方式为：

$$\begin{aligned}U=&\left(\left(\boldsymbol{k}(s_i),s_i\right),\left(\boldsymbol{k}(s_j),s_j\right),...,\left(\boldsymbol{k}(s_n),s_n\right)\right),\\ &\boldsymbol{k}(s_i)<\boldsymbol{k}(s_j)<...<\boldsymbol{k}(s_n)\end{aligned} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{k}(s)$为节点s的键值，n为节点数量。

每个节点s都有相应的键值，键值由k_1和k_2组成，当k_1相等时，比较k_2。键值的计算公式为：

$$\boldsymbol{k}(s)=\begin{bmatrix}k_1\\ k_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\min\left(g(s),r(s)\right)+h(s,s_{\text{start}})+K_{\text{m}}\\ \min\left(g(s),r(s)\right)\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\min(g(s),r(s))$为节点s到终点的距离，$h(s,s_{start})$为节点s到起点的启发式距离（通常为曼哈顿距离），K_m为当前移动的实际距离，s_{start}为起点。

在最初的路径规划中，为提高效率，在节点的键值计算过程中引入了启发式函数$h(s,s_{start})$。但是，当起点s_{start}变化时，节点键值的后续更新基于新的s_{start}，导致队列U中的节点优先级更新时不准确，并且对先前数据的利用率不足。为解决此问题，D*Lite算法引入了修饰符键值K_m，以确保路径更新期间在更新队列U中对节点进行合理排序。K_m的计算方式为：

$$K_m=\begin{cases}0, & s_{last}\text{为空值}\\ K'_m+h(s_{last},s_{start}), & \text{当车辆开始移动}\end{cases} \tag{4}$$

式中：s_{last}为上次进行规划时的起始节点，K'_m为上次进行规划时的K_m值。

2.3 时间窗模型

时间窗模型常用于解决车辆路径与生产车间调度问题[16-17]。该算法在预测式避障前提下，通过记录每条路径的占用时段，协调ICV的进入时刻，以在不改变既定路径的情况下最小化冲突次数。根据ICV的速度、起点、终点及途经节点，算法能够计算其占用各路径的时间窗，进而有序安排路径资源的锁定与释放。当系统为多个ICV进行路线规划时，不同ICV可共享同一路径，但时间窗不可重叠，且某时间段一经分配，其他ICV只能申请剩余空闲时段。本文的时间窗模型应用遵循以下假设：

a. 停车场内所有道路均为双车道并支持双向行驶，在ICV均保持正常行驶的情况下，不同车辆在同一路径上的占用时间窗允许重叠。

b. ICV在路径上保持恒定速度行驶。

c. 不考虑ICV加速和减速的时间。

d. 每辆ICV均被赋予特定的优先级属性。

本文采用集合法描述各路径段的时间窗占用情况，假设当前停车场内正在移动的ICV数量为n，ICV集合为$C=\{c_i|i=1,2,\cdots,n\}$。c_i拥有由系统规划的路径集合$R_i=\{l_s,l_{s1},\cdots,l_{sn}\}$和任务优先级$P_i$。本文采用任务起始时刻与任务类型两级判定机制，指定ICV在路径冲突时的通行优先权。以ICV任务启动时间作为主排序依据：由于执行停车任务的ICV需从入口依次入场，故不存在同时入场的情况；当入场ICV与离场ICV的任务起始时刻重合时，离场车辆优先占用冲突路径。设c_i的停车（或离场）任务的开始时刻为t_i，任务类型使用二元变量$k_i\in\{0,1\}$表示，$k_i=0$表示c_i执行停车任务，$k_i=1$表示c_i执行离场任务。因此，c_i的任务信息可以表示为$c_i=\{t_i,k_i,P_i,R_i\}$。

在时间窗模型中，一辆ICV占用某一路径段的时间窗常称为路径段的保留时间窗，路径段未被任何ICV占用的时间窗称为路径段的空闲时间窗[18]。本文中c_i的保留时间窗为：

$$T_j=\left\{\boldsymbol{t}_{ci}=\left(t_{ci}^{in},t_{ci}^{out}\right)|i=1,2,\cdots,n\right\} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{t}_{ci}$为被c_i占用路径段e_j的时间窗，t_{ci}^{in}、t_{ci}^{out}分别为c_i进入、离开路径段的时间。

停车场各路径段的空闲时间窗集合为：

$$F=\left\{f_{ej}|j=1,2,\cdots,m\right\} \tag{6}$$

式中：m为路径段数量，f_{ej}为路径段e_j的空闲时间窗集合。

f_{ej}的计算方式为：

$$f_{ej}=\left\{\boldsymbol{t}_k=\left(t_k^{start},t_k^{end}\right)|k=1,2,\cdots,a\right\} \tag{7}$$

式中：a为路径段e_j的空闲时间窗数量，$\boldsymbol{t}_k$为第k个空闲时间窗，t_k^{start}、t_k^{end}分别为第k个空闲时间窗的开始、结束时间。

3 基于时间窗的停车场ICV优化引导方法

本文以时间窗模型为基础，结合时间窗调整和路径重规划策略，根据车辆优先级进行冲突消解并为低优先级车辆重新规划最优路径，从而有效减少停车场的局部拥堵，提升停车效率。

3.1 停车场ICV冲突类型

ICV在行驶过程中可能发生多种冲突情况，冲突主要发生在行驶路段上或者交叉路口处。根据ICV的行驶状态，停车场内的ICV冲突类型可以分为路径冲突和节点冲突两类。

路径冲突指ICV为进、出车位而横向穿越车道时，与同车道内正常行驶的其他ICV产生轨迹交叉所引发的碰撞风险，如图1所示。

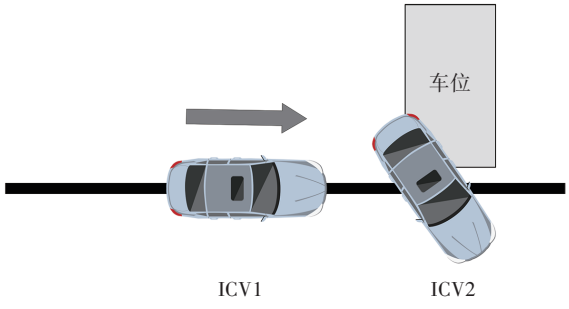
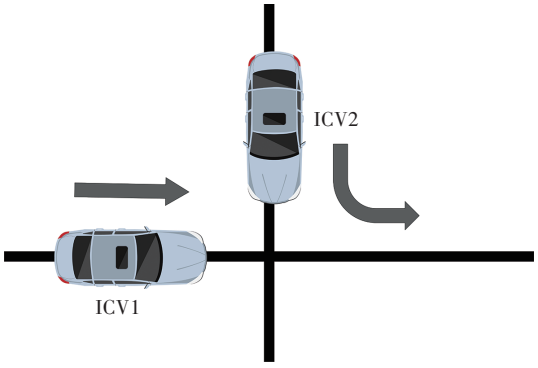
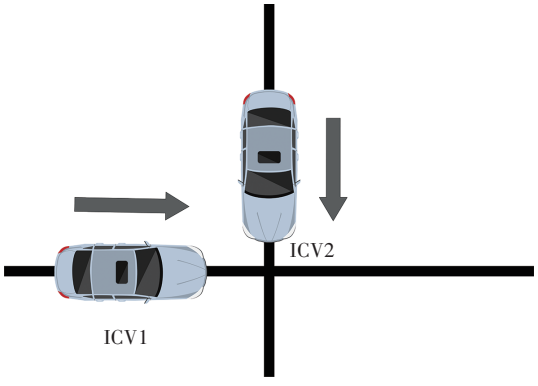


图1 路径冲突

节点冲突指多辆ICV同时抵达同一交叉路口节点时，因转向需求或行驶方向不一致而引发的碰撞风险，包括转向冲突和路径交叉冲突，如图2所示。转向冲突指当ICV在交叉路口转向需占用额外空间时，对向车辆未停车让行引发的冲突。路径交叉冲突指多台ICV沿不同轴向同时通过交叉节点时因运动轨迹的空间重叠引发的冲突。



（a）转向冲突



（b）路径交叉冲突

图2　节点冲突

3.2　时间窗计算

时间窗计算的核心在于量化ICV对路径资源的时空占用，需要推导车辆到达与离开路径段及交叉路口节点的时间点。在本文中，路径段由拓扑环境地图$G=(V,E)$中的边$E=(e_1,e_2,\cdots,e_n)$表示，交叉路口节点由其所对应的节点$V=(v_1,v_2,\cdots,v_n)$表示。因此需要计算ICV到达和离开各节点的时刻。定义ICV的车身长度为L_c；路径段的长度为地图G中边的长度，即构成边的两个节点之间的邻接权值，定义为L_{ei}；交叉路口节点v_i的长度定义为L_{vi}；ICV的行驶速度为V_c。

3.2.1　直行通过路径段

如图3所示，当ICV直行通过路径段时，以其外廓前沿进入路径段起点的时刻为开始时刻，外廓前沿离开路径段终点的时刻为结束时刻。因此，ICV占用路径段e_i的时间t_{ei}为：

$$t_{ei}=L_{ei}/V_c \tag{8}$$



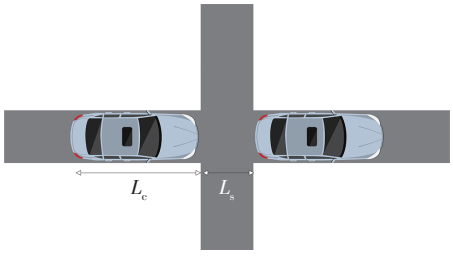
图3　ICV直行通过路径段时的时间窗计算

3.2.2　通过交叉路口

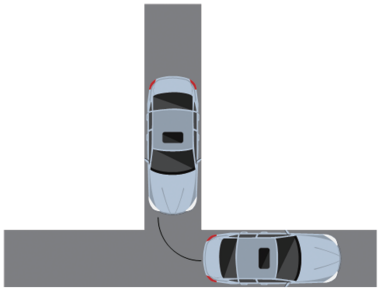
ICV通过交叉路口分为直行通过和转弯通过两种情况，时间窗计算如图4所示。当ICV直行通过交叉路口时，本文将ICV的外廓前沿进入交叉路口节点的时刻视为ICV进入交叉路口的时刻，ICV的外廓后沿离开交叉路口节点的时刻视为ICV离开交叉路口的时刻。当ICV转弯通过交叉路口时，运动轨迹为圆弧，因此车辆的转弯路径长度与其最小转弯半径R_c有关。时间窗起止时刻判断方式与直行一致。综上，ICV直行通过和转弯通过某一交叉路口时，占用该交叉路口的时间t_{vi}的计算公式分别为：

$$t_{vi}=\frac{L_{vi}+L_c}{V_c} \tag{9}$$

$$t_{vi}=\frac{\pi R_c/2+L_c}{V_c} \tag{10}$$



（a）直行通过交叉路口



（b）转弯通过交叉路口

图4　ICV通过交叉路口时的时间窗计算

3.3　考虑冲突消解效率的ICV优化引导方法

对于面向ICV的智能停车场，停车场系统能够通过与场内车辆进行实时交互来获取车辆信息（包括实时位置、行驶路径、停车耗时等），进而对停车场的未来情况进行预测。因此，可以基于时间窗模型，通过计算车辆因冲突而产生的额外等待时间更

新相应冲突路段的边权，并使用D*Lite算法进行重规划，帮助驾驶员避开拥堵路段，缩短行驶时间。具体流程为：

a. 车辆入场。停车场系统对各空闲车位进行路径规划，系统从中选取当前行驶路径最短的车位，将其设定为当前车辆c_i的目标车位，并生成对应的路径集合$R_i=\{e_s,e_{s1},\cdots,e_{sn}\}$。随后，系统将该车位的状态标记为“锁定”，并从后续车辆的可选空闲车位集合中移除。

b. 计算并更新当前停车场各路径段和路口节点的空闲时间窗集合F。

c. 计算并更新路径集合R_i的保留时间窗集合$T_i=\{\boldsymbol{t}_{es},\boldsymbol{t}_{es1},\cdots,\boldsymbol{t}_{esn}\}$，如$c_i$进入路径段$e_s$的时刻为$t_{es}^{in}$，离开路径段$e_s$的时刻为$t_{es}^{out}$，则时间窗$\boldsymbol{t}_{es}$被标记为$(t_{es}^{in},t_{es}^{out})$。

d. 通过检查T_i中的时间窗是否属于F，执行冲突检测与资源分配。若T_i中的所有元素均属于F，则在F中移除对应的时间窗资源，并更新F，输出R_i作为最优路径；若T_i中存在非空闲元素，如c_i在路径段e_s的保留时间窗$\boldsymbol{t}_{es}$已被其他ICV占用，则将存在冲突的时间窗$\boldsymbol{t}_{es}$向后延迟至最近可用空闲时段并同步延长其前一路径段的占用时间窗，记录车辆c_i在冲突路径段e_s的等待时间t_{es}^{delay}。更新并重新检测该路径的T_i，直至T_i中的所有元素均满足空闲状态，计算新的T_i。

e. 如果步骤d中存在时间窗调整，则基于上一步记录的各冲突路径段的等待时间，临时更新拓扑图中的各冲突路径段所对应的边权值，使用D*Lite算法基于更新后的拓扑图重新计算当前车辆到达停车位的最短路线。冲突路径段e_s的边权值D_{es}的更新方式为：

$$D'_{es}=D_{es}+t_{es}^{delay}\cdot V_c \tag{11}$$

式中：D'_{es}为更新后路径段e_s的边权值。

f. 从新的计算结果中提取更新后的路径集合。若新路径集合相较于原路径集合未发生变化，表明未找到更优路径，直接输出原路径集合作为最终路径；若新路径集合相较于原路径集合发生变化且为首次出现，则重复步骤c~步骤e。当新路径出现以下两种情况时终止循环并输出新路径作为最终路径：新路径相较于原路径未发生变化或在以往的重复步骤c~步骤e的循环中出现过；新路径的保留时间窗集合的各元素均属于空闲时间窗集合。

基于时间窗的停车场ICV优化引导方法流程如图5所示。

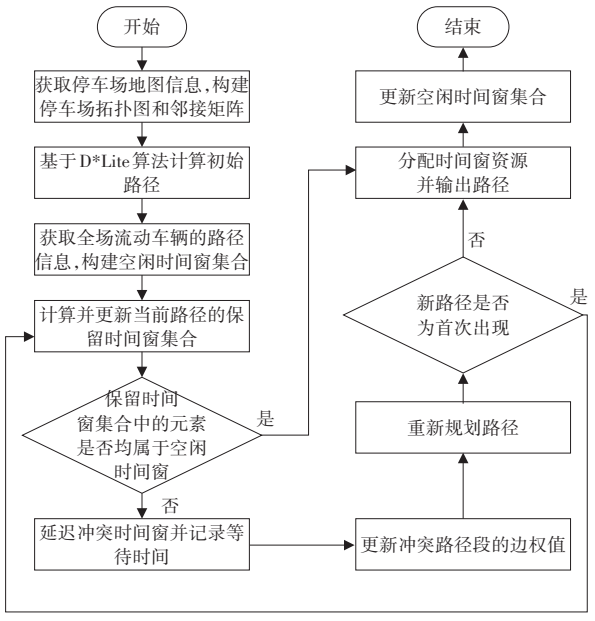


图5　基于时间窗的停车场ICV优化引导方法流程

4　仿真验证与结果分析

4.1　停车场路网建模

本文基于真实停车场环境开展仿真分析，环境建模与算法实现均基于Python语言完成。考虑到大型停车场通常设有多个出入口且不同分区间的车辆交互有限，为降低模型复杂度，本文选取停车场中的单一停车区域作为研究对象。图6展示了该停车区的布局情况，该区域包含117个车位，均为5.5 m×2.5 m的标准停车位，车道宽度为6 m。为研究停车场内的停车位路径引导问题，需要根据停车场内部路网的情况进行数学建模，将停车场内道路连接处、场内泊位、电梯以及停车场入口简化为节点，建立地下停车场路网拓扑图，如图7所示。图中编号1~9为交叉路口节点，编号10~91为道路节点，编号92~208为车位节点。根据图7，使用邻接矩阵法对路网模型的数据进行描述存储，供后续计算车辆到达各空停车位的最短时间和最短路线使用。

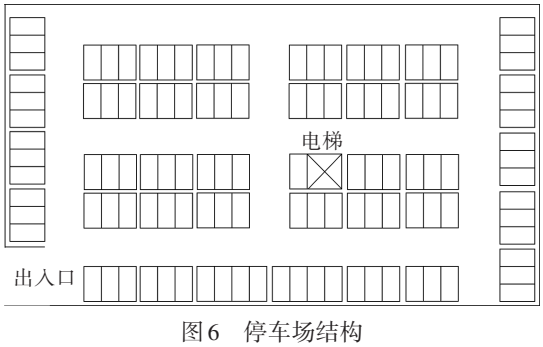


图6　停车场结构

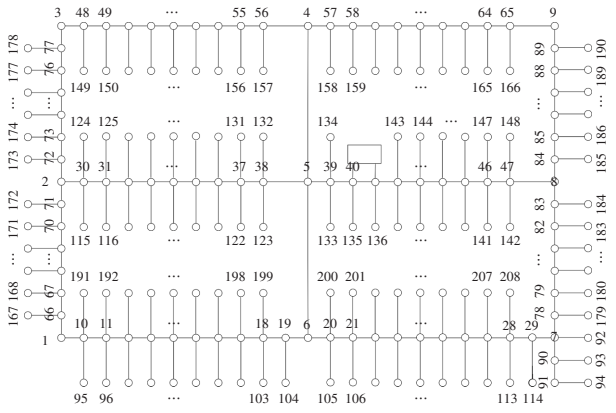


图7　停车场拓扑图

4.2　模拟示例

为直观展示本文提出的优化引导策略的运行机制，选取典型停车案例进行详细分析。为保证结果的可比性，本文后续验证中的所有车辆均采用统一参数配置：ICV的行驶速度为2 m/s、车身长度为5 m、最小转弯半径为5.5 m，泊车时长为30 s。基于前文构建的环境地图，模拟了对ICV的完整引导流程。所设计的案例如下：ICV1在00:00时刻到达停车场出入口（节点1）并向停车场系统发出停车引导请求，在系统根据其选择的目标车位（节点104）进行路径引导后，ICV1沿所规划路径行驶；ICV2在00:08时刻到达停车场出入口并向停车场系统发出停车引导请求，车辆所选车位为节点135。系统为ICV1和ICV2规划的初始路径如表1所示，基于两车行驶路径所构建的初始时间窗如图8所示。

表1　ICV初始路径信息

ICV编号	ICV路径
1	1–10–11–12–13–14–15–16–17–18–19–104
2	1–10–11–12–13–14–15–16–17–18–19–6–6–39–40–135

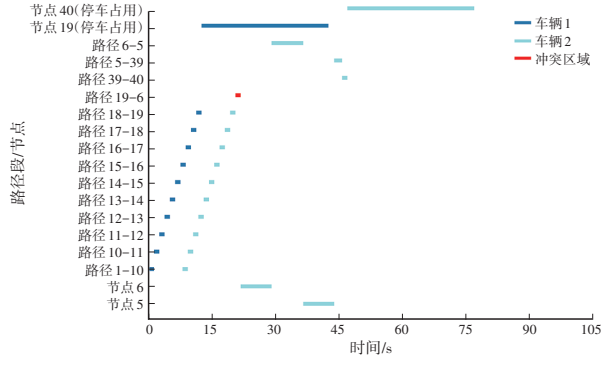


图8　ICV行驶路径的保留时间窗

由图8可知，ICV2在预计行驶过程中，将在路径段(19,6)发生路径冲突，其中ICV1在第12.5 s到达节点19并开始停车，于第42.5 s完成停车，ICV2在第20.5 s驶入路径段(19,6)，此时ICV1尚未完成停车。根据3.1节中对冲突类型的定义，此时ICV1与ICV2之间发生路径冲突，根据时间窗等待策略，为消解ICV之间的时间窗冲突，ICV2在路径段(19,6)的保留时间窗将延后至空闲时间窗。经时间窗等待策略调整后的ICV路径保留时间窗如图9所示，ICV2进入路段(19,6)的时刻由调整前的第20.5 s调整至第42.5 s，后续路径段时间窗依次顺延。记录ICV2在路径段(19,6)的等待时间22 s，将拓扑图中的路径段(19,6)所对应的边权值增加44 m。基于更新后的拓扑图，使用D*Lite算法为ICV2重新规划路径，新路径的保留时间窗如图10所示。重规划的路径未产生新冲突，将其作为最终路径发送给ICV2。表2展示了重新规划前、后ICV2的行驶时间，从61.0 s减少至39.7 s，缩短了34.9%，有效提升了停车效率。

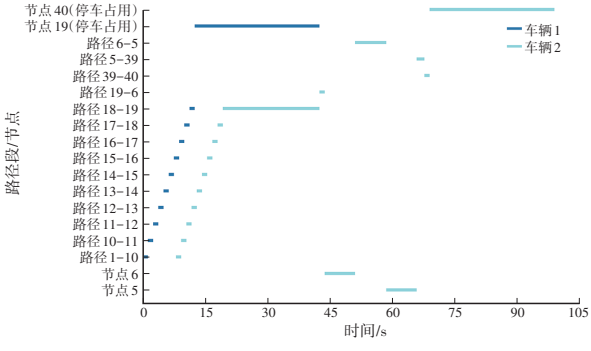


图9　应用时间窗调整策略后的时间窗

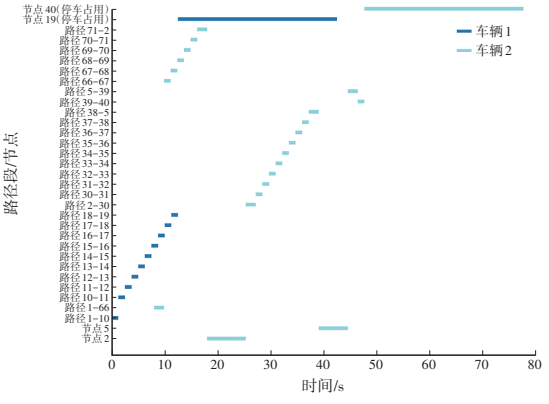


图10　重规划后的时间窗

表2　重规划前、后ICV2路径对比

路径名称	路径	时间/s
原路径	1–10–11–12–13–14–15–16–17–18–19–6–6–39–40–135	61.0
重规划后路径	1–66–67–68–69–70–71–2–30–31–32–33–34–35–36–37–38–5–39–40–135	35.9

4.3　仿真验证

为验证本文所提出的停车场ICV引导方法的有

效性，基于前文构建的环境地图开展了仿真验证。共设置5组不同场内饱和度的场景条件，场内饱和度指仿真开始时停车场车位的饱和度，随着仿真过程中车辆的进出场（进场车辆与出场车辆数量的比值为9∶1），停车场的整体饱和度将上升约20百分点。每组仿真分别基于所设定的场内饱和度随机设定若干空闲车位。每组仿真重复进行20次，每次模拟包含20辆车的寻泊与离场过程。为模拟高峰时段的运营状况，入场车辆以3~5 s的时间间隔进入停车场，并将当时与入口距离最近的空闲车位设为其目标车位。首先使用传统D*Lite算法对车辆进行路径规划作为对照组，接着进行基于本文改进方法的车辆运行仿真，分别计算车辆的平均行驶用时，在不同场内饱和度条件下，基于传统D*Lite算法和基于本文改进方法的车辆平均行驶用时如表3所示。

表3　算法改进前、后车辆的平均行驶用时对比

场内饱和度/%	平均行驶用时/s		车均行驶用时下降率/%
	改进前	改进后	
40	40.83	30.03	26.5
50	40.51	29.18	28.0
60	42.93	30.18	29.7
70	44.40	31.36	29.4
80	47.58	32.53	31.6

从表3中可以看出，本文提出的改进引导方法的整体效能与停车场内饱和度呈正相关关系。当场内初始饱和度达到最高值（80%）时，车辆平均行驶时长的降幅最大，该条件下改进方法使各车辆的行驶用时缩减区间的占比情况如表4所示，所有车辆的行驶总时长缩短6 007.1 s，车辆平均行驶用时减少31.6%。

表4　不同行驶时长缩减量区间的车辆占比情况

缩减区间/s	0	>0~15	>15~30	>30~45	>45
占比/%	35.7	25.0	20.0	10.8	8.5

综上，本文提出的改进车位引导方法通过动态评估停车场各通道的未来占用状态，能够识别潜在拥堵路段和节点，以最短行驶时间为目标为车辆规划最佳路线，从而有效缓解停车场局部区域的拥堵现象并减少车辆行驶途中不必要的起停，提升停车效率。

5　结束语

本文针对大型地下停车场环境下采用静态路径规划时存在的高峰时段局部拥堵问题，提出了一种面向智能网联汽车的动态路径引导策略。首先，引入时间窗模型对场内车辆行驶中的时空冲突进行精准预测。随后，将冲突引发的停车等待时间量化为受影响路段的动态边权增量，构建能够实时反映停车场交通状况的拓扑图。最后，结合D*Lite算法实现路径重规划，优化车辆的停车路径。仿真验证结果表明，本文所提出的优化策略能够更有效地消解车辆间的路径冲突，从而降低停车场内局部拥堵的发生频率。

在后续研究中，将深入考虑停车场内更多的动态影响因素以增强引导系统在复杂停车环境下的表现，同时针对未来实际交通环境中智能网联汽车与传统车辆混合行驶的情况，研究更具适用性的引导策略。

参　考　文　献

[1] PARMAR J, DAS P, DAVE S M. Study on Demand and Characteristics of Parking System in Urban Areas: A Review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(1): 111-124.

[2] XIAO Y T, CAI Z, LI J L, et al. A Collaborative Reservation Mechanism of Multiple Parking Lots Based on Dynamic Vehicle Path Planning[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021(1).

[3] AHAD A, KIDWAI F A. Navigating Parking Choices: Drivers' Perspectives on Parking Guidance and Information Systems: A Survey-Based Case Study[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2025, 10(2).

[4] HAN Z H, SUN H T, HUANG J F, et al. Path Planning Algorithms for Smart Parking: Review and Prospects[J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(7).

[5] GE X X. Optimal Route Planning of Parking Lot Based on Dijkstra Algorithm[C]// 2017 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS). Huai An City, China: IEEE, 2017: 221-224.

[6] KIM M, AHN J, PARK J. TargetTree-RRT*: Continuous-Curvature Path Planning Algorithm for Autonomous Parking in Complex Environments[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(1): 606-617.

[7] QIN Z B, CHEN X, HU M J, et al. A Novel Path Planning Methodology for Automated Valet Parking Based on Directional Graph Search and Geometry Curve[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 132.

[8] ZHANG J R, CHEN H, SONG S Y, et al. Reinforcement Learning-Based Motion Planning for Automatic Parking

System[J]. IEEE Access, 2020, 8: 154485-154501.

[9] PAIDI V, FLEYEH H, HÅKANSSON J, et al. Smart Parking Sensors, Technologies and Applications for Open Parking Lots: A Review[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(8): 735-741.

[10] CHAI R Q, LIU D R, LIU T H, et al. Deep Learning-Based Trajectory Planning and Control for Autonomous Ground Vehicle Parking Maneuver[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(3): 1633-1647.

[11] YU L Y, JIANG H B, HUA L. Anti-Congestion Route Planning Scheme Based on Dijkstra Algorithm for Automatic Valet Parking System[J]. Applied Sciences, 2019, 9(23).

[12] ZHANG Z S, HE X M, HUANG J W, et al. Parking Detection Using Combined Magnetic Sensor and Pulsed Coherent Radar[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(18): 17210-17219.

[13] HASAN M O, ISLAM M M, ALSAAWY Y. Smart Parking Model Based on Internet of Things (IoT) and TensorFlow [C]// 2019 7th International Conference on Smart Computing & Communications (ICSCC). Sarawak, Malaysia: IEEE, 2019: 1-5.

[14] YU J B, YANG M, ZHAO Z Y, et al. Path Planning of Unmanned Surface Vessel in an Unknown Environment Based on Improved D* Lite Algorithm[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112873.

[15] REN Z Q, RATHINAM S, LIKHACHEV M, et al. Multi-Objective Path-Based D* Lite[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 3318-3325.

[16] ZHOU B H, HE Z X. A Novel Hybrid-Load AGV for JIT-Based Sustainable Material Handling Scheduling with Time Window in Mixed-Model Assembly Line[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(3): 796-817.

[17] HU J, LI S Y, WANG H R, et al. Eco-Approach at an Isolated Actuated Signalized Intersection: Aware of the Passing Time Window[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 435.

[18] LI X Y, TIAN P, LEUNG S C. Vehicle Routing Problems with Time Windows and Stochastic Travel and Service Times: Models and Algorithm[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 125(1): 137-145.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年4月2日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部