

文章编号:1671-8879(2016)01-0085-07

受限大规模路网中货车国道模式路径规划

张照生¹, 杨殿阁², 高 利¹, 连小珉²

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 清华大学 汽车节能与安全国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要:为减少高速花费, 满足货车驾驶人尽量多地在国道上行驶的需求, 提出一种货车国道模式下的目标引导路径规划算法, 使车辆尽量在国道行驶。算法在不同等级路网中采用社区分块和行政区域分块相结合的方法; 在高层路网中结合路段标志算法对路网进行预处理, 提高规划速度; 并针对货车在禁行区域的规划提出了解决思路。研究结果表明: 货车国道模式下的目标引导算法在中长距离路径规划中优势明显, 与传统的 A* 算法相比, 拓展节点数减少 60% 以上, 寻路耗时减少 70%, 最优路径中国道的比例增加了 17%, 最优路径更符合货车驾驶人的驾驶倾向; 货车屏障代价模型可以满足起点或终点在禁行区域内的货车路径规划问题, 使货车尽量减少在禁行区域内行驶, 并寻找最近的国道快速离开禁行区域。该方法在提高规划速度的同时, 可以保证车辆尽量在国道上行驶, 满足货车驾驶经济性及禁行区域路径规划的需求。

关键词:交通工程; 货车路径规划; 国道模式; 目标引导; 货车禁行

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

Truck path planning of national highway mode in restricted large-scale road network

ZHANG Zhao-sheng¹, YANG Dian-ge², GAO Li¹, LIAN Xiao-min²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To meet the requirements that truck drivers are prone to drive in national highway to reduce freeway charge, a goal-directed truck path planning algorithm was proposed to accommodate the national highway mode. Both the community block and administrative regional block were used together in different grade road network in this algorithm. Combined with the arc-flag algorithm, the road network preconditioned in higher road network combined with the arc-flag algorithm to improve the path planning speed, and then the idea for truck path planning in restricted area was proposed. The results show that the goal-directed truck path planning algorithm for national highway mode is efficient in middle and long path planning, especially in long path planning. Compared with traditional A* algorithm, more than 60% of nodes are not expanded and 70% path finding time is saved as well, and the optimal path is more conform to the truck drivers' tendency with the proportion of national highway increased by 17% in the optimal path. Truck barrier model proposed in this paper can meet the demand of path planning in

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 北京理工大学 2014 校优青一跨学科项目; 汽车安全与节能国家重点实验室基金项目(KF14031)

作者简介: 张照生(1984-), 男, 山东单县人, 讲师, 工学博士, E-mail: zhangzhaosheng@bit.edu.cn。

restricted area, which minimize the driving time in restricted area by finding the nearest national highway. This method can keep the truck run at national highway and improve the path planning speed. In other words, it can meet the requirement of low cost and the rationality of the path planning in restricted area for truck. 1 tab, 10 figs, 20 refs.

Key words: traffic engineering; truck path planning; national highway mode; goal-directed; truck restrict

0 引言

与轿车的路径规划相比,货车的路径规划需要更多地考虑经济性因素^[1]。中国高速公路大多为收费道路,在长途运输过程中驾驶人更倾向于经济性更高的国道模式(国道模式是指规划出的路径尽量走国道)。另外,中国很多城市市区对货车采取限行措施,因此货车需要考虑更多限行信息,货车导航要求规划的路线尽量避开禁行区域。

文献[2]基于图搜索标记算法提出了一种可应用于实际受限路网中的最优路径算法;文献[3]提出了一种多类型约束下最优路径统一求解的几何代数算法;文献[4]针对特殊地理位置提出了区域约束下的通过性路径规划算法;文献[5]将多个约束条件统一规划为单一约束权值,将路段长度、等级及路况转化为车辆的行驶速度,然后采用 Dijkstra 方法实现限定搜索区域内的路径规划;文献[6-9]针对货车特性将转向、质量等因素考虑到路径规划中,进一步提高了货车路径规划的可用性。

上述算法旨在解决禁行区域下货车如何规划的问题,但如果货车已经进入禁行区(即规划起点或终点在禁行区域内),也要求系统能够顺利完成路径规划,而当前针对汽车限行的规划多是对路网数据进行预处理,不能灵活改变路段代价,从而导致在禁行区域内不能规划。为减少路径规划中搜索的数据量,当前路网多进行预处理,按照道路等级分层^[10-15]。在这种分层路网中,道路等级越高其所在路网层级越高,路网也越稀疏,在高层路网拓展能大大加快规划速度。当前路网最高级为高速路,若在该层路网中寻路,规划速度虽然可以提高,但规划结果高速路所占比例较大,不能满足驾驶人的行车经济性需求。次高级路网为高速路与国道的混合道路,该层路网有 15 万个节点和 32 万个路段,在该层利用 A* 算法寻路规划速度仍然过慢。文献[16-18]提出了一种设置路段标志的方法,该方法将路网分成 M 块,每条路段对应分配 M bit,每个 bit 表示该路段是否在到达对应块的最优路上。该方法中路段

标志数据量与路网中块的数量成平方关系,对于大规模路网,若路网中分块数量较多,则生成的路段标志数据量过大^[19-20],而嵌入式系统存储能力不能满足系统需求;若路网中分块数量较少,则每块中数据量较大,嵌入式系统内存无法满足数据加载的需求。

针对上述问题,本文提出一种路网分层与路段标志结合的目标引导路径规划算法,在低层路网中采用社区分块方法,在高层路网中采用行政区域分块的方法,并结合路段标志方法加速路径规划;还提出道路屏障代价模型思路,适用于受限路网中的路径规划,在减少车辆进入禁行区域的同时,在禁行区域也能完成路径规划。

1 路网预处理

1.1 路网社区分块与行政区域分块

定义路网 $G = \{V, E\}$, V 为节点集合, E 为路段集合,路段 $e = (u, v)$ ($u \in V, v \in V$),其中 u 为路段首端点, v 为路段末端点,路段方向由 u 到 v ,路段 e 为节点 u 的后向路段,为节点 v 的前向路段。

路网按照路段等级进行分层,等级越高路网越稀疏,低等级路网包含高等级路网,路网之间的关系为

$$\begin{cases} G = \{G^h | h = 1, 2, \dots, H\} \\ G^H \subset G^{H-1} \subset \dots \subset G^1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为路网等级; H 为路网最高等级; G^h 表示等级为 h 的路网。

路网分层与分块如下页图 1 所示。图 1 中,线的粗细表示道路等级的高低,数字表示路段等级(在双层路网中,高级路段表示第 2~4 级道路,低级路段表示第 1 级道路),高级路段与高级路段的交点为高等级节点,高等级路段与低等级路段的交点或低等级路段之间的交点为低等级节点。在双层路网分层模型中,高等级路网中只有高级路段,高级路段与低级路段相交形成的低级节点被贯通而丢弃,2 条高级路段形成 1 条高级路段。

低等级路网($h < H$)中,路网分块按照社区分块的方法进行,高等级路网形成的最小封闭区域为

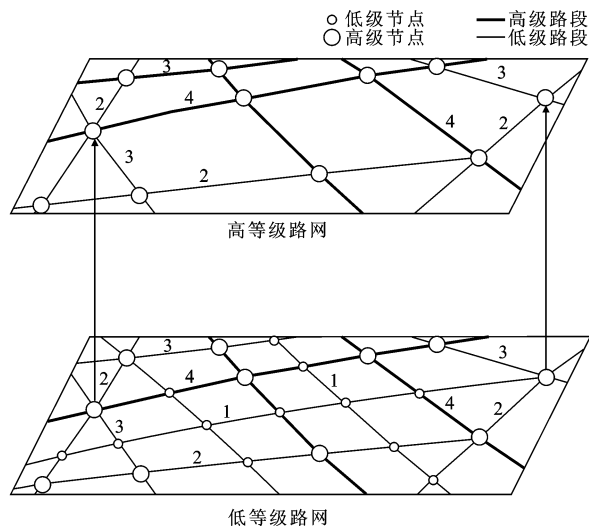


图 1 双层路网分层分块模型

Fig. 1 Hierarchical block model of double layer road network

低级路网中的“块”,如图 1 所示,低等级路网中粗实线构成的封闭区域为下层路网的最小块。

社区分块按照节点的等级进行,路网中道路是有等级的,但节点没有等级,节点的等级 λ_u 由节点所连道路的最高等级确定,节点等级确定如图 2 所示。图中标注的数字表示各道路的级别,图中节点 u 的级别 $\lambda_u = 4$ 。

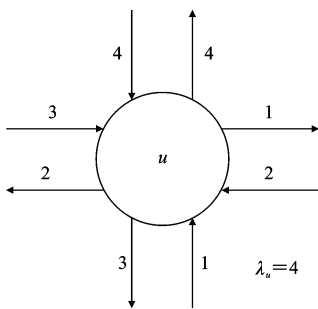


图 2 节点级别

Fig. 2 Node level

社区分块方法以高等级路网做边界,不会破坏路网的拓扑结构,并且城市路网规划时考虑道路的分布情况,每个块中道路数量分布均匀,因此在使用过程中,数据利用效率较高。最高级路网($h=H$)的分块是以路网行政区域进行分块,每个城市单独为 1 个块。高等级路网分块公式为

$$G^H = \{G_b^H | b=1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

式中: G_b^H 为路网 G^H 中的一块; b 为块序号; M 为路网 G^H 中块的个数。

块边界节点是指处于块边缘邻接边界的节点,其相邻节点至少有 1 个与该节点不在同一块中,块 G_b^H 的边界节点集合定义为 $B(G_b^H)$ 。

1.2 受限路网的屏障代价

很多城市对货车采取禁行措施,不允许货车在市内行驶,因此要求在规划过程中避免车辆进入市区,尽量绕城规划路径,但当货车的起点或终点在市区禁行区域时,也要求能完成路径规划。本文提出一种屏障代价处理方法,在规划过程中尽量减少车辆进入禁行区,在起点和终点附近允许车辆通过禁行区域。

从节点 u 向节点 v 拓展,路段 $e(u, v)$ 代价为 $w(e)$,若路段为禁行路段,则起点 s 到节点 v 的代价 $d(s, v)$ 为

$$d(s, v) = \begin{cases} d(s, u) + \lambda w(e) + d^p & e = e_i^p \\ d(s, u) + \lambda w(e) & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d^p 为禁行路段惩罚代价; λ 为禁行系数; e_i^p 为起点 s 到达当前节点过程中遇到的连续禁行路段的第 1 条路段。

路径拓展过程中连续遇到多条禁行路段代价的计算如图 3 所示。图 3 中,箭头表示路段方向,圆形斜线标记为禁行标志,路段 e_1 和 e_2 均为禁行路段,经过禁行路段后,图中节点 v 和节点 z 的代价为

$$\begin{cases} d(s, v) = d(s, u) + \lambda w(e_1) + d^p \\ d(s, z) = d(s, v) + \lambda w(e_2) \end{cases} \quad (4)$$

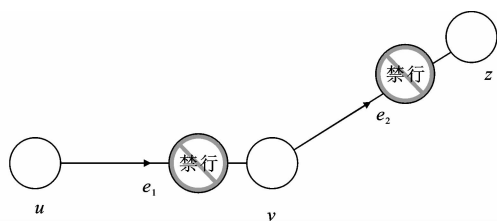


图 3 禁行路网屏障代价

Fig. 3 Barrier cost of restricted road network

1.3 高级路网路段标志处理

高级路网中路段标志表示该路段是否在到达目标块的最优路径上,在向目标块拓展过程中只拓展路段标志为“真”的节点。通过设置路段标志,减少拓展节点的数量,从而加快路径拓展过程。在实际应用过程中,为减少标志的读取数量,将路段标志按块为单位进行存储。

高级路网中路段集合 $E^H = \{e_k | k=1, 2, \dots, K\}$, 其中 k 为路段序号, K 为路网 G^H 中路段总数。对于路网 G^H 中任意块 G_b^H , 设置最优路径标志集合 F_b 为

$$F_b = \{F_b^f, F_b^r\} \quad (5)$$

式中: F_b^f 为正向拓展最优路径标志集合; F_b^r 为逆向拓展最优路径标志集合。

F_b^f 和 F_b^r 分别为

$$F_b^f = \{f_{b,k}^f | k=1,2,\dots,K\} \quad (6)$$

$$F_b^r = \{f_{b,k}^r | k=1,2,\dots,K\} \quad (7)$$

式中: $f_{b,k}^f$ 为路段 e_k 对块 G_b^H 正向拓展的最优路径标志; $f_{b,k}^r$ 为路段 e_k 对块 G_b^H 逆向拓展的最优路径标志。

块 G_b^H 对正反 2 个拓展方向均设置 K 个标志位, 每个标志位大小为 1 bit。标志位 $f_{b,k}^f$ 的值为

$$f_{b,k}^f = \begin{cases} 1 & e_k \in P_{u,b} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{u,b}$ 为路段 e_k 的首端点 u 到块 G_b^H 中任一节点的最优路。

标志位的获取如图 4 所示。 G_b^H 为目标块, e_k 为路网中的任意路段, 图中黑色粗实线为块边界, 块的内部节点以白色节点表示, 边界节点以灰色节点表示。节点 u, v 分别为路段 e_k 的首端点和终端点, 箭头表示路段方向。取块 G_b^H 中任意 1 个边界节点 $t_i \in B(G_b^H)$, 对节点 t_i 实行逆向广度优先拓展, 拓展到节点 u , 节点 u 属性为

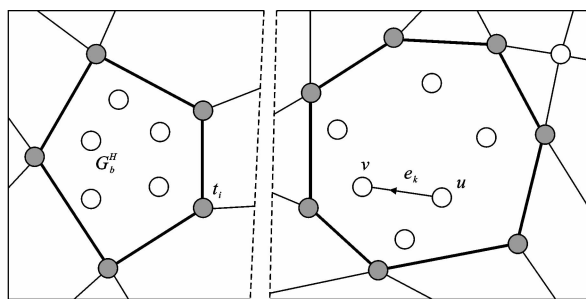


图 4 最优路标志位计算

Fig. 4 Calculation of the optimal path flag

$$u = (u_b, u_i, u_f, u_d) \quad (9)$$

式中: u_b 为节点 u 所在的块序号; u_i 为节点 u 在块 u_b 中的节点块序号; u_f 为禁行标志, 表示该节点的后向路段为禁行路段。

待路网 G^H 中所有节点均拓展结束, 则路段 e_k 到节点 t_i 的最优路标志位 $f_{b,k}^{f,i}$ 为

$$f_{b,k}^{f,i} = \begin{cases} 1 & u_d - v_d = w(e_k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_d, v_d 分别为节点 u, v 到节点 t 的最小代价。

路段 e_k 到块 G_b^H 的最优路标志位 $f_{b,k}^f$ 为

$$f_{b,k}^f = f_{b,k}^{f,1} \cup f_{b,k}^{f,2} \cup \dots \cup f_{b,k}^{f,R} \quad (11)$$

式中: 符号“ \cup ”表示逻辑并集; R 为块 G_b^H 中边界节点的个数。

如上所述, 对目标块 G_b^H 中边界节点进行逆向广度优先拓展, 可以获取各路段到该块的正向最优路标志; 同理, 对目标块边界节点进行正向拓展, 可

以获取各路段到该块的逆向最优路标志。路段 e_k 到节点 t_i 的最优路标志位 $f_{b,k}^{r,i}$ 及路段 e_k 到块 G_b^H 的最优路标志位 $f_{b,k}^r$ 分别为

$$f_{b,k}^{r,i} = \begin{cases} 1 & v_d - u_d = w(e_k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$f_{b,k}^r = f_{b,k}^{r,1} \cup f_{b,k}^{r,2} \cup \dots \cup f_{b,k}^{r,R} \quad (13)$$

2 国道模式路径规划

路径规划采用分层双向 Dijkstra 算法, 在达到最高层之前, 确定起点或终点在不同等级路网中所属的块, 起点或终点的升级拓展在节点所属的块内进行, 在最高层路网中拓展采用目标引导路径规划算法。

2.1 节点升级拓展

在节点的升级拓展中, 起点和终点的拓展原理相似, 由起点 s 所在的经纬度坐标确定该点在不同等级路网中所属的块 $G_{b(s)}^h$ ($h=1,2,\dots,H$)。起点和终点的升级拓展范围如图 5 所示。节点的升级拓展需要满足 3 个条件: ①有上级节点; ②当前路网级别不是最高拓展等级; ③上级节点在拓展范围内。

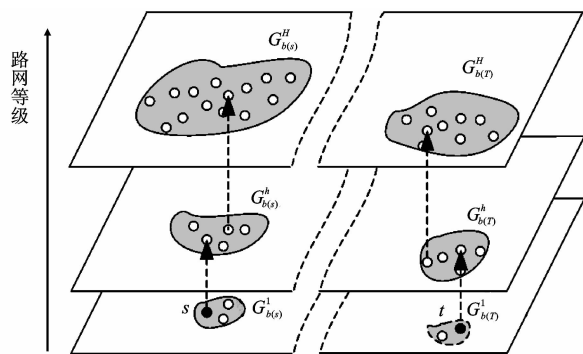


图 5 节点升级拓展

Fig. 5 Upgrade expansion of node

在块 $G_{b(s)}^h$ ($1 \leq h < H$) 中拓展时, 从正向节点队列 $U^{h,f}$ (队列中节点按照节点代价由小到大排序) 中提取拓展节点 $u^{h,f}$, 由节点 $u^{h,f}$ 向邻接节点拓展, 拓展到的节点 $v^{h,f}$ 属性为

$$v^h = \{v_d^{h,f}, v_p^{h,f}, v_c^{h,f}\} \quad (14)$$

式中: $v_d^{h,f}$ 为节点 $v^{h,f}$ 到起点 s 的最小代价; $v_p^{h,f}$ 为节点 $v^{h,f}$ 的父节点序号; $v_c^{h,f}$ 为节点的状态。

拓展节点分为 3 种状态: 未拓展节点、在拓展节点和已拓展节点。其中未拓展节点为还没有拓展到的节点, 优先队列中的节点为在拓展节点, 已经拓展结束的节点为已拓展节点; 在拓展过程中首先要判断待拓展节点是否为已拓展节点, 若是, 则不再拓展。若节点 $v^{h,f}$ 存在上级节点, 则记录其上级节点

$v^{h+1,f}$ 为

$$v^{h+1,f} = \begin{cases} v_d^{h+1,f} = v_d^{h,f} \\ v_p^{h+1,f} = v_p^{h,f} \end{cases} \quad (15)$$

将节点 $v^{h+1,f}$ 放入队列 $U^{h+1,f}$ 中,在上层路网拓展中使用。

2.2 国道层路网拓展

在国道层路网 G^H 中拓展时,从正向节点队列 $U^{H,f}$ 中提取拓展节点 $u^{H,f}$,节点的邻接节点为 $v^{H,f}$,两节点之间的路段为 e_k ,假定终点 t 在路网中的块为 G_b^H ,则判断是否向节点 $v^{H,f}$ 拓展由式(16)决定,即

$$f(u^{H,f}, v^{H,f}) = \begin{cases} 1 & f_{b,k}^f = 1 \\ 0 & f_{b,k}^f = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $f(u^{H,f}, v^{H,f})$ 为节点 $u^{H,f}$ 向 $v^{H,f}$ 的拓展函数,若函数值为 1,则拓展节点 $v^{H,f}$,否则不拓展。

拓展节点 $v^{H,f}$ 的属性为

$$v^{H,f} = \{v_d^{H,f}, v_p^{H,f}, v_c^{H,f}\} \quad (17)$$

若某节点 v^H 在正向和反向拓展中都为已拓展节点,则该节点称为双黑节点,记为 $v^{H,B}$,记此时的最优路代价 $d_{\min} = \min(d_{\min}, v_d^{H,f} + v_d^{H,r})$ 。在节点拓展中,单向拓展结束的条件是节点队列为空或当前节点代价大于最优路代价。高层路网拓展结束条件为

$$N(v^{H,B}) \geq N^T \vee (f^f = 1 \wedge f^r = 1) \quad (18)$$

式中: $N(v^{H,B})$ 为拓展中双黑节点的个数; N^T 为算法中设定的双黑点阈值,文中 N^T 的值取 2; f^p 、 f^r 分别为正向拓展和反向拓展结束标志;符号“ \vee ”和“ \wedge ”分别表示逻辑“或”和逻辑“与”。

3 试验验证

验证试验在嵌入式平台完成,试验平台为 500 MHz 的 ARM 处理器,内存 128 MB,存储卡为 4 GB 的 SD 卡。试验路网为全国路网,路网中节点数为 448 万,路段数为 684 万,路网数据总大小为 1.17 GB,路段标志占用的字节数为 65 MB,算法用 Visual Studio 2008 编程实现。寻路算法的流程如图 6 所示。在寻路过程中只拓展最优标志节点,非最优节点及其所连接的后向节点都不再拓展,如此大大减少了拓展节点数量,增加了路径规划速度。

为验证算法的实际效果,本文做了中长距离的路径规划试验。在中距离试验中,起点设在北京市浩阳腾飞汽车公司,终点设在济南市物流中心站,使用传统的 A* 算法,规划效果如图 7 所示。图中路径规划的起点和终点用旗帜表示,深色粗实线表示

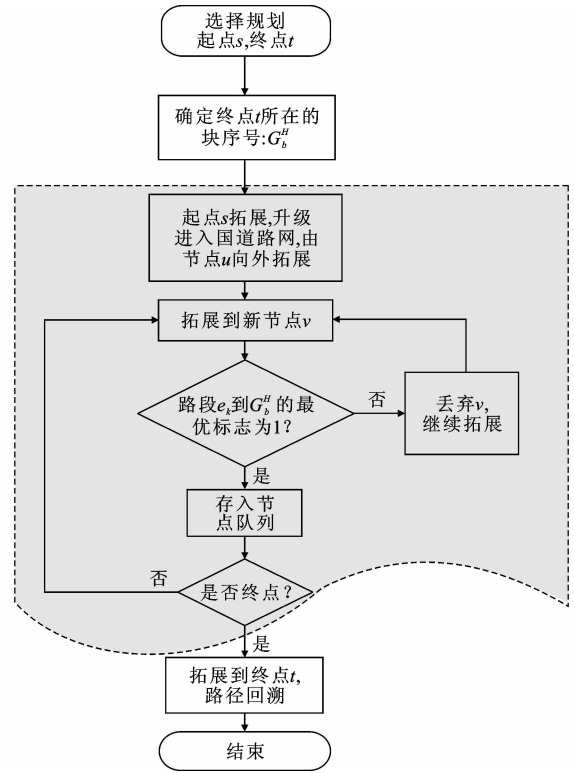
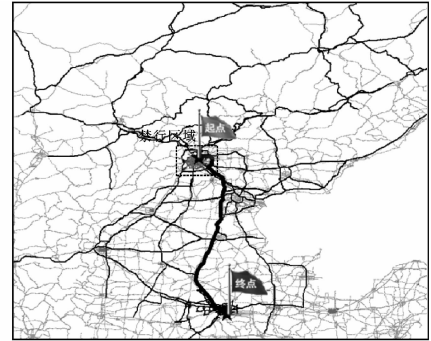


图 6 寻路算法流程

Fig. 6 Flow of path planning algorithm



(a) 高速模式



(b) 国道模式

图 7 货车国道模式与 A* 算法高速模式比较

Fig. 7 Comparison of national highway mode with

A* algorithm freeway mode for truck

最优路,深色细实线表示拓展到的路段,浅色细实线为未拓展到的路段,图 7 中高速模式是指算法在由

高速路形成的路网中完成规划。高速模式下拓展的路网范围更大,但由于高层路网稀疏,高速模式拓展的节点数相对较少,但其最优路中高速路的比例过高,不符合驾驶经济性要求。国道模式路网密度相对较大,与高速模式相比国道模式拓展的节点数更多,但国道模式的最优路中,国道比例较高,其结果更符合驾驶经济性需求。

使用目标引导的国道模式算法规划效果如图 8 所示。从图 8 可以看出,目标引导算法拓展的节点数大大减少,并且该算法获得的最优路国道的比例更高,3 种规划算法的规划结果对比如表 1 所示。

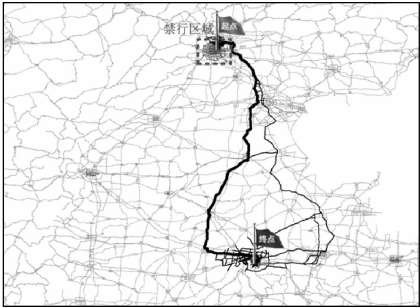


图 8 目标引导算法规划结果

Fig. 8 Planning result of goal-directed algorithm

表 1 不同规划模式结果对比

Tab. 1 Comparison on results of different planning modes

最优路规划模式	拓展节点个数	寻路耗时/s	最优路中各类型道路比例/%		
			高速	国道	其他
A* 算法高速模式	18 103	7.0	91.5	5.9	2.6
A* 算法国道模式	61 591	18.6	6.8	72.0	21.2
目标引导算法国道模式	5 123	4.4	2.9	89.9	7.2

从表 1 可以看出,目标引导算法的国道模式与 A* 算法国道模式相比,其拓展数大大减少,并且其寻路耗时减少了 70%,最优路中高速路的比例有所减少,国道的比例增加了 17%,更符合货车驾驶人的驾驶倾向;与 A* 算法高速模式相比,目标引导算法的国道模式中,国道的比例有根本性的改变。同时考虑货车尽量减少进入禁行区域,但如果必须进入禁行区域也要正常完成规划,本文提出的屏障代价可以满足这一需求。图 9 为图 8 中起点的放大区域,从图中可以看出,即使起点在禁行区域内,利用屏障代价仍然可以实现路径规划,规划的最优路能尽量减少在禁行区域中拓展,寻找最近的国道并快速离开禁行区域。

长距离规划以浙江杭州中山北路为起点,以新疆克拉玛依市艾壁母亲杂粮西餐厅为终点进行规

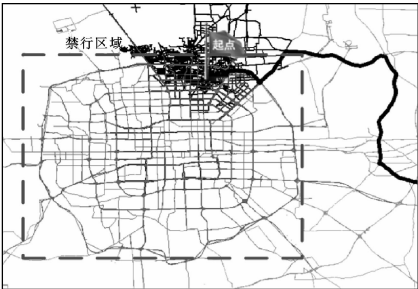
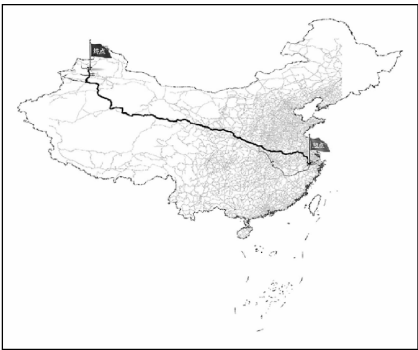


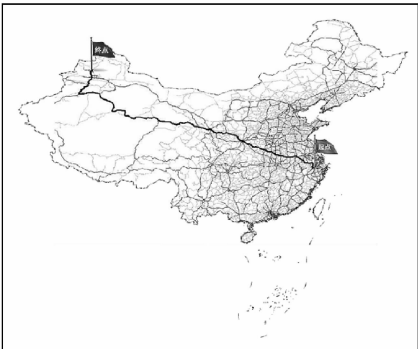
图 9 禁行区域

Fig. 9 Restricted area

划,规划结果如图 10 所示。由图中可以看出,在长距离规划中,与 A* 算法相比,目标引导算法拓展范围更小(图中目标引导算法拓展节点 2 288 个,A 算法拓展节点 30 万以上)。由于内存的限制,国道模式下嵌入式设备利用 A* 算法无法完成正常拓展,因此在长距离规划中目标引导算法的优越性可以更好得到体现。



(a) 目标引导算法



(b) A* 算法

图 10 国道模式下长距离规划算法结果对比

Fig. 10 Results comparison of long-range planning algorithm under national highway mode

4 结 语

(1)提出受限大规模路网中,国道模式下的目标引导路径规划算法,算法在提高规划速度的同时能满足货车驾驶人对路径经济性的需求。

(2)货车屏障代价模型使货车尽量减少在禁行

区域内行驶,并且可以满足起点或终点在禁行区域内的货车路径规划问题。

(3)低层路网社区分块方法可保证不同块中数据量的均匀分布,提高数据的利用率,高层路网中按照行政区域分块的方法可保证较小的路段标志数据量,与路段标志预处理方法结合可明显提高路径规划速度,适用于货车中长距离的路径规划。

(4)后续研究可考虑加入时间禁行信息和动态交通信息,进一步提高算法在货车路径规划中的实用性。

参考文献:

References:

- [1] 祁文祥,陆志强,孙小明.带软时间窗的集货与送货多车辆路径问题节约算法[J].交通运输工程学报,2010,10(2):99-103,109.
QI Wen-xiang,LU Zhi-qiang,SUN Xiao-ming. Saving algorithm of multi-vehicle routing problem with pick-up-delivery and soft time window[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2010,10(2):99-103,109. (in Chinese)
- [2] 李挺,杨殿阁,罗禹贡,等.受限路网中汽车行驶最优路径算法及优化实现[J].汽车工程,2005,27(6):706-709.
LI Ting,YANG Dian-ge,LUO Yu-gong,et al. Study on a vehicle shortest path algorithm based on constrained road network model and its implementation [J]. Automotive Engineering,2005,27(6):706-709. (in Chinese)
- [3] 俞肇元,胡勇,朱晓林,等.基于几何代数的多类型约束路网最优路径分析算法[J].地理与地理信息科学,2014,30(2):10-15.
YU Zhao-yuan,HU Yong,ZHU Xiao-lin,et al. A unified geometric algebra algorithm for solving multi-type constrained optimal path[J]. Geography and Geo-Information Science,2014,30(2):10-15. (in Chinese)
- [4] 张照生.交通约束下的行车最优路径规划[D].北京:清华大学,2013.
ZHANG Zhao-sheng. Optimum vehicular path planning under traffic restriction[D]. Beijing:Tsinghua University,2013. (in Chinese)
- [5] 张美玉,简铮峰,侯向辉,等. Dijkstra 算法在多约束农产品配送最优路径中的研究应用[J]. 浙江工业大学学报,2012,40(3):321-325,330.
ZHANG Mei-yu,JIAN Cheng-feng,HOU Xiang-hui,et al. Research on Dijkstra algorithm in optimal path with multiple constraints of agricultural product distribution[J]. Journal of Zhejiang University of Tech-

nology,2012,40(3):321-325,330. (in Chinese)

- [6] SU J M,CHANG C H,YANG T P,et al. Development of shortest path computing mechanism with consideration of commercial vehicles characteristics[C]//IEEE. Proceedings of 2014 International Conference on Smart Computing Workshops. Hong Kong:IEEE,2014:29-34.
- [7] MARZIEH M,KARIMI B,MAHOOTCHI M. Dynamic pricing and freight transportation planning in oligopolistic freight networks; a game theoretic approach[J]. Transportmetrica A: Transport Science,2015,11(10):918-938.
- [8] ZIPS P,BOCK M,KUGI A. An optimisation-based path planner for truck-trailer systems with driving direction changes [C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle:IEEE,2015:630-636.
- [9] 王丰元,潘福全,张丽霞,等.基于交通限制的路网最优路径算法[J].交通运输工程学报,2005,5(1):92-95.
WANG Feng-yuan,PAN Fu-quan,ZHANG Li-xia,et al. Optimal path algorithm of road network with traffic restriction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2005,5(1):92-95. (in Chinese)
- [10] LIU B. Route finding by using knowledge about the road network [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans,1997,27(4):436-448.
- [11] 郑烟武.基于分层分区的动态路径规划算法研究[D].广州:华南理工大学,2011.
ZHENG Yan-wu. The study of dynamic route planning based on hierarchical and partitioned A-Star algorithm[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2011. (in Chinese)
- [12] 张静.面向路径规划的导航路网数据模型研究[D].北京:中国矿业大学,2009.
ZHANG Jing. Research on navigation network data model for route planning[D]. Beijing:China University of Mining and Technology,2009. (in Chinese)
- [13] 蔡文学,郑烟武,钟慧玲,等.基于层次策略的路径规划算法对比研究[J].交通信息与安全,2012,30(1):52-57.
CAI Wen-xue,ZHENG Yan-wu,ZHONG Hui-ling,et al. Comparative study of route planning algorithms based on hierarchical strategy[J]. Journal of Transportation Information and Safety,2012,30(1):52-57. (in Chinese)