

1. 一种智能汽车园区道路路径规划方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 按照动态窗口避障算法对智能汽车进行路径规划,得到智能汽车在园区道路上的理论避障路径;

2) 智能汽车按照理论避障路径行驶的过程中,通过感知系统判断行驶道路前方是否存在理论避障路径规划之外的障碍物:

2-1) 若无障碍物,智能汽车沿车道靠右行驶;

2-2) 若有障碍物,则由感知系统进行障碍物识别,得到障碍物与智能汽车的相对位置以及移动速度;

3) 若障碍物的移动速度 \leq 智能汽车车速,障碍物与智能汽车的相对距离 $>$ 安全车距,且在车道左侧的安全车距内不存在障碍物,按照下列方法针对步骤2-2)对智能汽车的行驶路径重新进行规划,使智能汽车按重新规划的避障路径进行超车:

3-1) 根据预设的车道内势场模型、车道间势场模型、障碍物势场模型,智能汽车通过五次多项式模型,计算超车过程中所需的不同理论超车时间在笛卡尔坐标系下对应的若干候选轨迹簇,形成候选轨迹簇集合;

3-2) 采用矩形碰撞检测法,剔除候选轨迹簇集合中的潜在碰撞轨迹簇;

3-3) 以安全性、舒适性和换道效率为评价指标,构建剩余的候选轨迹簇对应的多性能协同优化函数;

3-4) 将函数值最小的多性能协同优化函数对应的候选轨迹作为最优避障轨迹;

3-5) 将笛卡尔坐标系下的最优避障轨迹转化为Frenet坐标系下的避障轨迹,将Frenet坐标系下的避障轨迹作为重新规划的避障路径;

4) 智能汽车按重新规划的避障路径进行超车后,继续按照理论避障路径行驶,并重复步骤2)至步骤3),直到智能汽车到达目的地。

2. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法,其特征在于,所述五次多项式模型的行驶轨迹曲线表达式如下所示:

$$\begin{cases} f(x,t) = \sum_{i=0}^5 a_i (t-t_0)^i \\ f(y,t) = \sum_{i=0}^5 b_i (t-t_0)^i \end{cases}$$

式中, x 为智能汽车的纵向位置, y 为智能汽车的横向位置, t 为智能汽车的行驶时间, t_0 为智能汽车的超车起始时间, $f(x,t)$ 为智能汽车的纵向位置与行驶时间的函数关系, $f(y,t)$ 为智能汽车的横向位置与行驶时间的函数关系, a_i 为智能汽车纵向位置的五次多项式系数, b_i 为智能汽车横向位置的五次多项式系数。

3. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法,其特征在于,所述车道内势场模型的函数表达式如下所示:

$$P_{road} = \begin{cases} A_{road1} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road1})^2}{2\sigma_{road1}^2}\right), y_{road1} < y(t) < y_{road1} + L_{width} / 2 \\ A_{road2} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road2})^2}{2\sigma_{road2}^2}\right), y_{road1} + L_{width} / 2 < y(t) < y_{road1} + L_{width} \\ 0, \text{其它} \end{cases}$$

式中, P_{road} 为车道内势场值, A_{road1} 为车道右侧内势场增益系数, A_{road2} 为车道左侧内势场增益系数, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, y_{road1} 为车道右侧的横向坐标, y_{road2} 为车道左侧的横向坐标, σ_{road1} 为车道右侧内势场形状系数, σ_{road2} 为车道左侧内势场形状系数, L_{width} 为车道宽度。

4. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法, 其特征在于, 所述车道间势场模型的函数表达式如下所示:

$$P_{mid} = \begin{cases} A_{mid1} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road1})^2}{2\sigma_{mid1}^2}\right), y_{road1} < y(t) < y_{road1} + L_{width} / 2 \\ A_{mid2} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road2})^2}{2\sigma_{mid2}^2}\right), y_{road1} + L_{width} / 2 < y(t) < y_{road1} + L_{width} \\ 0, \text{其它} \end{cases}$$

式中, P_{mid} 为车道间势场值; A_{mid1} 为右侧车道间势场增益系数, A_{mid2} 为左侧车道间势场增益系数, y_{road1} 为右侧车道边缘线横向坐标, y_{road2} 为左侧车道边缘线横向坐标, σ_{mid1} 为右侧车道间势场形状系数, σ_{mid2} 为左侧车道间势场形状系数, L_{width} 为车道宽度。

5. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法, 其特征在于, 所述障碍物势场模型的函数表达式如下所示:

$$P_{obstacle} = A_{obstacle} \exp\left(-\left(\frac{(x(t) - x_{obstacle}(t))^2}{2\sigma_{obstacle1}^2} + \frac{(y(t) - y_{obstacle}(t))^2}{2\sigma_{obstacle2}^2}\right)^c\right)$$

式中, $P_{obstacle}$ 为障碍物的势场值, $A_{obstacle}$ 为障碍物的势场增益系数, $x(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的纵向坐标, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, $x_{obstacle}(t)$ 为障碍物在 t 时刻的纵向坐标, $y_{obstacle}(t)$ 为障碍物在 t 时刻的横向坐标, $\sigma_{obstacle1}$ 为椭圆形障碍物势场的横向系数, $\sigma_{obstacle2}$ 为椭圆形障碍物势场的纵向系数, c 为椭圆形障碍物势场的指数系数。

6. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法, 其特征在于, 采用矩形碰撞检测法剔除潜在碰撞轨迹簇的步骤如下:

b-1) 首先将智能汽车与障碍物的俯视图简化为矩形, 判断在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点是否会处于障碍物对应的矩形内;

b-2) 若在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点会处于障碍物对应的矩形内, 则从候选轨迹簇集合中剔除该候选轨迹簇;

b-3) 若在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点不会处于障碍物对应的矩形内,则保留该候选轨迹簇在候选轨迹簇集合中。

7. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法,其特征在于,所述函数值最小的多性能协同优化函数的表达式如下所示:

$$\min E(t_f) = w_1 \frac{\int_0^{t_f} j_x^2(t) dt}{j_{x,\max} a_{x,\max}} + w_2 \frac{\int_0^{t_f} j_y^2(t) dt}{j_{y,\max} a_{y,\max}} + w_3 \frac{\sum_{i=1}^n P_{all}(x,y)}{n} + w_4 \frac{t_f}{kw}$$

s. t.

$$\begin{cases} 0 < y(t) < w \\ 0 < \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} < v_{\max} \\ |a_x(t)| < a_{x,\max} \\ |a_y(t)| < a_{y,\max} \\ |j_x(t)| < j_{x,\max} \\ |j_y(t)| < j_{y,\max} \end{cases}$$

式中, w_1 为智能汽车纵向加速度变化率的权重系数, w_2 为智能汽车横向加速度变化率的权重系数, w_3 为安全性评价指标的权重系数, w_4 为换道效率评价指标的权重系数, w 为道路宽度, t_f 为避障时长, k 为形状系数, $P_{all}(x,y)$ 为在全局坐标系下 (x,y) 位置处的势场值, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, $v_x(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的纵向车速, $v_y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向车速, v_{\max} 为最高允许车速, $a_x(t)$ 为智能汽车行驶过程中的纵向加速度, $a_y(t)$ 为智能汽车行驶过程中的横向加速度, $a_{x,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度, $a_{y,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度, $j_x(t)$ 为智能汽车行驶过程中的纵向加速度变化率, $j_y(t)$ 为智能汽车行驶过程中的横向加速度变化率, $j_{x,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度变化率, $j_{y,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度变化率。

8. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法,其特征在于,按照下列公式将笛卡尔坐标系下的最优避障轨迹转化为Frenet坐标系下的避障轨迹:

$$\left\{ \begin{array}{l} s = s_r \\ \dot{s} = \frac{v_x \cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})}{1 - \kappa_r l} \\ \ddot{s} = \frac{a_x \cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) - \dot{s}^2 [l'(\kappa_r \frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} - \kappa_r) - (\kappa_r' l + \kappa_r l')] }{1 - \kappa_r l} \\ l = \text{sign}((y_x - y_r) \cos(\theta_{\bar{r}}) - (x_x - x_r) \sin(\theta_{\bar{r}})) \sqrt{(x_x - x_r)^2 + (y_x - y_r)^2} \\ l' = (1 - \kappa_r l) \tan(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) \\ l'' = -(\kappa_r' l + \kappa_r l') \tan(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) + \frac{1 - \kappa_r l}{\cos^2(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} \left[\frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} \kappa_x - \kappa_r \right] \end{array} \right.$$

式中, s 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向位移, \dot{s} 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向速度, \ddot{s} 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向加速度, l 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移, l' 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移对弧长的一阶导数, l'' 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移对弧长的二阶导数, $\theta_{\bar{r}}$ 为参考线的方位角, $\theta_{\bar{x}}$ 为智能汽车当前位置的方位角, v_x 为智能汽车的速度, a_x 为智能汽车的加速度, κ_r 为参考线 $\bar{r}(s)$ 的曲率, κ_x 为智能汽车当前位置处的曲率, s_r 为智能汽车在笛卡尔坐标系下相对于参考线的纵向位移, κ_r' 为参考线 $\bar{r}(s)$ 的曲率 κ_r 对弧长的一阶导数。

9. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法, 其特征在于, 针对步骤2-2) 对智能汽车的行驶路径重新进行规划之前, 根据障碍物的移动速度与智能汽车车速, 按照下列方法控制智能汽车的行驶:

- ①若障碍物的移动速度 > 智能汽车车速, 智能汽车继续沿车道靠右行驶;
- ②若障碍物的移动速度 \leq 智能汽车车速, 且障碍物与智能汽车的相对距离 \leq 安全车距, 智能汽车紧急停车;
- ③若障碍物的移动速度 \leq 智能汽车车速, 障碍物与智能汽车的相对距离 > 安全车距, 且车道左侧的安全车距内存在障碍物, 则使 $0 <$ 智能汽车车速 $<$ 障碍物的移动速度。

10. 根据权利要求1所述智能汽车园区道路路径规划方法, 其特征在于, 采用平衡优化器算法, 或者麻雀搜索算法计算各个候选轨迹簇对应的多性能协同优化函数的函数值。

智能汽车园区道路路径规划方法

技术领域

[0001] 本发明涉及自动驾驶领域,具体涉及一种智能汽车园区道路路径规划方法。

背景技术

[0002] 随着人工智能的快速发展,智能汽车已逐渐应用于人们日常生活的各个领域。当前关于智能汽车的研究大多集中在道路较宽的主干道,譬如高速公路、国道、省道等结构化道路,对园区道路场景的研究相对较少。道路较宽的主干道能够给汽车提供足够的行驶空间,道路上出现障碍物的概率相对较低,对路径规划相对容易,而园区道路一般都较为狭窄,车道宽度通常仅为3.5米,还是双向行驶,并且道路上出现障碍物的概率相对较高,因此对路径规划相对较难。

[0003] 目前,智能汽车在园区道路下的路径规划通常都是采取局部路径规划,常见的局部路径规划方法包括人工势场法、曲线插值法和多项式曲线法,均各种不同的缺陷,如:

[0004] (1)人工势场法数学表达直观、具有良好的实时性,但其存在易陷于局部最优的问题。

[0005] (2)曲线插值法应用较为广泛,但在复杂的动态道路场景中难以进行表达。

[0006] (3)多项式曲线法根据智能汽车的初始与目标位置规划换道轨迹,有着仅通过调整多项式阶数便可达到期望性能的特点,但安全性难以进行评估。

[0007] 由此可见,目前的局部路径规划方法考虑的因素不够全面,尤其是未对车辆行驶的规划路径进行必要的碰撞检测,不能满足智能汽车的实时性要求,极易导致交通事故的发生。

发明内容

[0008] 本发明的目的是针对现有技术对应的不足,提供一种智能汽车园区道路路径规划方法,针对园区道路进行路径规划相对较难的问题,融合五次多项式和改进的人工势场法,建立了车道内势场模型、车道间势场模型和障碍物势场模型,在智能汽车按照理论避障路径行驶的过程中,依靠感知系统对智能汽车的行驶路径重新进行规划避障,并且为了满足智能汽车的实时性要求,对智能汽车在避障规划中进行了必要的碰撞检测,避免了交通事故的发生。

[0009] 本发明的目的是采用下述方案实现的:一种智能汽车园区道路路径规划方法,包括以下步骤:

[0010] 1)按照动态窗口避障算法对智能汽车进行路径规划,得到智能汽车在园区道路上的理论避障路径;

[0011] 2)智能汽车按照理论避障路径行驶的过程中,通过感知系统判断行驶道路前方是否存在理论避障路径规划之外的障碍物:

[0012] 2-1)若无障碍物,智能汽车沿车道靠右行驶;

[0013] 2-2)若有障碍物,则由感知系统进行障碍物识别,得到障碍物与智能汽车的相对

位置以及移动速度；

[0014] 3) 若障碍物的移动速度 \leq 智能汽车车速,障碍物与智能汽车的相对距离 $>$ 安全车距,且在车道左侧的安全车距内不存在障碍物,按照下列方法针对步骤2-2)对智能汽车的行驶路径重新进行规划,使智能汽车按重新规划的避障路径进行超车；

[0015] 3-1) 根据预设的车道内势场模型、车道间势场模型、障碍物势场模型,智能汽车通过五次多项式模型,计算超车过程中所需的理论超车时间在笛卡尔坐标系下对应的若干候选轨迹簇,形成候选轨迹簇集合；

[0016] 3-2) 采用矩形碰撞检测法,剔除候选轨迹簇集合中的潜在碰撞轨迹簇；

[0017] 3-3) 以安全性、舒适性和换道效率为评价指标,构建剩余的候选轨迹簇对应的多性能协同优化函数；

[0018] 3-4) 将函数值最小的多性能协同优化函数对应的候选轨迹作为最优避障轨迹；

[0019] 3-5) 将笛卡尔坐标系下的最优避障轨迹转化为Frenet坐标系下的避障轨迹,将Frenet坐标系下的避障轨迹作为重新规划的避障路径；

[0020] 4) 智能汽车按重新规划的避障路径进行超车后,继续按照理论避障路径行驶,并重复步骤2)至步骤3),直到智能汽车到达目的地。

[0021] 优选地,所述五次多项式模型的行驶轨迹曲线表达式如下所示：

$$[0022] \quad \begin{cases} f(x,t) = \sum_{i=0}^5 a_i(t-t_0)^i \\ f(y,t) = \sum_{i=0}^5 b_i(t-t_0)^i \end{cases}$$

[0023] 式中, x 为智能汽车的纵向位置, y 为智能汽车的横向位置, t 为智能汽车的行驶时间, t_0 为智能汽车的超车起始时间, $f(x,t)$ 为智能汽车的纵向位置与行驶时间的函数关系, $f(y,t)$ 为智能汽车的横向位置与行驶时间的函数关系, a_i 为智能汽车纵向位置的五次多项式系数, b_i 为智能汽车横向位置的五次多项式系数。

[0024] 优选地,所述车道内势场模型的函数表达式如下所示：

$$[0025] \quad P_{road} = \begin{cases} A_{road1} \exp\left(\frac{(y(t)-y_{road1})^2}{2\sigma_{road1}^2}\right), y_{road1} < y(t) < y_{road1} + L_{width}/2 \\ A_{road2} \exp\left(\frac{(y(t)-y_{road2})^2}{2\sigma_{road2}^2}\right), y_{road1} + L_{width}/2 < y(t) < y_{road1} + L_{width} \\ 0, \text{其它} \end{cases}$$

[0026] 式中, P_{road} 为车道内势场值, A_{road1} 为车道右侧内势场增益系数, A_{road2} 为车道左侧内势场增益系数, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, y_{road1} 为车道右侧的横向坐标, y_{road2} 为车道左侧的横向坐标, σ_{road1} 为车道右侧内势场形状系数, σ_{road2} 为车道左侧内势场形状系数, L_{width} 为车道宽度。

[0027] 优选地,所述车道间势场模型的函数表达式如下所示：

$$[0028] \quad P_{mid} = \begin{cases} A_{mid1} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road1})^2}{2\sigma_{mid1}^2}\right), & y_{road1} < y(t) < y_{road1} + L_{width} / 2 \\ A_{mid2} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road2})^2}{2\sigma_{mid2}^2}\right), & y_{road1} + L_{width} / 2 < y(t) < y_{road1} + L_{width} \\ 0 & , \text{其它} \end{cases}$$

[0029] 式中, P_{mid} 为车道间势场值; A_{mid1} 为右侧车道间势场增益系数, A_{mid2} 为左侧车道间势场增益系数, y_{road1} 为右侧车道边缘线横向坐标, y_{road2} 为左侧车道边缘线横向坐标, σ_{mid1} 为右侧车道间势场形状系数, σ_{mid2} 为左侧车道间势场形状系数, L_{width} 为车道宽度。

[0030] 优选地, 所述障碍物势场模型的函数表达式如下所示:

$$[0031] \quad P_{obstacle} = A_{obstacle} \exp\left(-\left(\frac{(x(t) - x_{obstacle}(t))^2}{2\sigma_{obstacle1}^2} + \frac{(y(t) - y_{obstacle}(t))^2}{2\sigma_{obstacle2}^2}\right)^c\right)$$

[0032] 式中, $P_{obstacle}$ 为障碍物的势场值, $A_{obstacle}$ 为障碍物的势场增益系数, $x(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的纵向坐标, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, $x_{obstacle}(t)$ 为障碍物在 t 时刻的纵向坐标, $y_{obstacle}(t)$ 为障碍物在 t 时刻的横向坐标, $\sigma_{obstacle1}$ 为椭圆形障碍物势场的横向系数, $\sigma_{obstacle2}$ 为椭圆形障碍物势场的纵向系数, c 为椭圆形障碍物势场的指数系数。

[0033] 优选地, 采用矩形碰撞检测法剔除潜在碰撞轨迹簇的步骤如下:

[0034] b-1) 首先将智能汽车与障碍物的俯视图简化为矩形, 判断在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点是否会处于障碍物对应的矩形内;

[0035] b-2) 若在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点会处于障碍物对应的矩形内, 则从候选轨迹簇集合中剔除该候选轨迹簇;

[0036] b-3) 若在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点不会处于障碍物对应的矩形内, 则保留该该候选轨迹簇在候选轨迹簇集合中。

[0037] 优选地, 所述函数值最小的多性能协同优化函数的表达式如下所示:

$$\min E(t_f) = w_1 \frac{\int_0^{t_f} j_x^2(t) dt}{j_{x,\max} a_{x,\max}} + w_2 \frac{\int_0^{t_f} j_y^2(t) dt}{j_{y,\max} a_{y,\max}} + w_3 \frac{\sum_{i=1}^n P_{all}(x, y)}{n} + w_4 \frac{t_f}{kw}$$

[0038] s. t.

$$[0039] \quad \begin{cases} 0 < y(t) < w \\ 0 < \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} < v_{\max} \\ |a_x(t)| < a_{x,\max} \\ |a_y(t)| < a_{y,\max} \\ |j_x(t)| < j_{x,\max} \\ |j_y(t)| < j_{y,\max} \end{cases}$$

[0040] 式中, w_1 为智能汽车纵向加速度变化率的权重系数, w_2 为智能汽车横向加速度变化率的权重系数, w_3 为安全性评价指标的权重系数, w_4 为换道效率评价指标的权重系数, w 为道路宽度, t_f 为避障时长, k 为形状系数, $P_{\text{all}}(x, y)$ 为在全局坐标系下 (x, y) 位置处的势场值, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, $v_x(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的纵向车速, $v_y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向车速, v_{\max} 为最高允许车速, $a_x(t)$ 为智能汽车行驶过程中的纵向加速度, $a_y(t)$ 为智能汽车行驶过程中的横向加速度, $a_{x,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度, $a_{y,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度, $j_x(t)$ 为智能汽车行驶过程中的纵向加速度变化率, $j_y(t)$ 为智能汽车行驶过程中的横向加速度变化率, $j_{x,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度变化率, $j_{y,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度变化率。

[0041] 优选地,按照下列公式将笛卡尔坐标系下的最优避障轨迹转化为Frenet坐标系下的避障轨迹:

$$[0042] \quad \begin{cases} s = s_r \\ \dot{s} = \frac{v_x \cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})}{1 - \kappa_r l} \\ \ddot{s} = \frac{a_x \cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) - \dot{s}^2 [l'(\kappa_r \frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} - \kappa_r) - (\kappa_r' l + \kappa_r l')]}{1 - \kappa_r l} \\ l = \text{sign}((y_x - y_r) \cos(\theta_{\bar{r}}) - (x_x - x_r) \sin(\theta_{\bar{r}})) \sqrt{(x_x - x_r)^2 + (y_x - y_r)^2} \\ l' = (1 - \kappa_r l) \tan(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) \\ l'' = -(\kappa_r' l + \kappa_r l') \tan(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) + \frac{1 - \kappa_r l}{\cos^2(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} \left[\frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} \kappa_x - \kappa_r \right] \end{cases}$$

[0043] 式中, s 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向位移, \dot{s} 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向速度, \ddot{s} 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向加速度, l 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移, l' 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移对弧长的一阶导数, l'' 为智

能汽车在Frenet坐标系下的横向位移对弧长的二阶导数, θ_r 为参考线的方位角, θ_x 为智能汽车当前位置的方位角, v_x 为智能汽车的速度, a_x 为智能汽车的加速度, κ_r 为参考线 $\vec{r}(s)$ 的曲率, κ_x 为智能汽车当前位置处的曲率, s_r 为智能汽车在笛卡尔坐标系下相对于参考线的纵向位移, κ_r' 为参考线 $\vec{r}(s)$ 的曲率 κ_r 对弧长的一阶导数。

[0044] 优选地, 针对步骤2-2) 对智能汽车的行驶路径重新进行规划之前, 根据障碍物的移动速度与智能汽车车速, 按照下列方法控制智能汽车的行驶:

[0045] ①若障碍物的移动速度 > 智能汽车车速, 智能汽车继续沿车道靠右行驶;

[0046] ②若障碍物的移动速度 \leq 智能汽车车速, 且障碍物与智能汽车的相对距离 \leq 安全车距, 智能汽车紧急停车;

[0047] ③若障碍物的移动速度 \leq 智能汽车车速, 障碍物与智能汽车的相对距离 > 安全车距, 且车道左侧的安全车距内存在障碍物, 则使 $0 <$ 智能汽车车速 $<$ 障碍物的移动速度。

[0048] 优选地, 采用平衡优化器算法, 或者麻雀搜索算法计算各个候选轨迹簇对应的多性能协同优化函数的函数值。

[0049] 本发明的优点在于, 当前的避障研究中大多将车辆简化为质点, 然而在道路较为狭窄的园区场景中, 车辆的外形不能简单忽略。为保证智能汽车在行车过程中安全行驶, 需要对智能汽车和其周围的障碍物进行碰撞检测。考虑到道路上障碍物的外形大多为不规则的图形, 在进行避障过程的碰撞检测时, 难以直接建模量化表示, 因此需要对智能汽车的外观形状进行适当的精简, 选用矩形等量化模型进行智能汽车避障过程的碰撞检测。

附图说明

[0050] 图1为本发明的流程图;

[0051] 图2为本发明中对智能汽车的行驶路径重新进行规划的流程图;

[0052] 图3为本发明实施例中的车道内势场模型;

[0053] 图4为本发明实施例中的车道间势场模型;

[0054] 图5为本发明实施例中的障碍物势场模型;

[0055] 图6为本发明实施例中的总势场模型;

[0056] 图7为本发明实施例中的矩形碰撞检测示意图;

[0057] 图8为本发明实施例中进行矩形碰撞检测时无人车与障碍物未发生碰撞、发生碰撞的示意图。

具体实施方式

[0058] 如图1至图8所示, 一种智能汽车园区道路路径规划方法, 包括以下步骤:

[0059] 1) 按照动态窗口避障算法对智能汽车进行路径规划, 得到智能汽车在园区道路上的理论避障路径;

[0060] 2) 智能汽车按照理论避障路径行驶的过程中, 通过感知系统判断行驶道路前方是否存在理论避障路径规划之外的障碍物:

[0061] 2-1) 若无障碍物, 智能汽车沿车道靠右行驶;

[0062] 2-2) 若有障碍物, 则由感知系统进行障碍物识别, 得到障碍物与智能汽车的相对

位置以及移动速度；

[0063] 本实施例中，针对步骤2-2)对智能汽车的行驶路径重新进行规划之前，根据障碍物的移动速度与智能汽车车速，按照下列方法控制智能汽车的行驶：

[0064] ①若障碍物的移动速度>智能汽车车速，智能汽车继续沿车道靠右行驶；

[0065] ②若障碍物的移动速度≤智能汽车车速，且障碍物与智能汽车的相对距离≤安全车距，智能汽车紧急停车；

[0066] ③若障碍物的移动速度≤智能汽车车速，障碍物与智能汽车的相对距离>安全车距，且车道左侧的安全车距内存在障碍物，则使 $0 < \text{智能汽车车速} < \text{障碍物的移动速度}$ 。

[0067] 3)若障碍物的移动速度≤智能汽车车速，障碍物与智能汽车的相对距离>安全车距，且在车道左侧的安全车距内不存在障碍物，按照下列方法针对步骤2-2)对智能汽车的行驶路径重新进行规划，使智能汽车按重新规划的避障路径进行超车：

[0068] 3-1)根据预设的车道内势场模型、车道间势场模型、障碍物势场模型，智能汽车通过五次多项式模型，计算超车过程中所需的不同理论超车时间在笛卡尔坐标系下对应的若干候选轨迹簇，形成候选轨迹簇集合；

[0069] 所述五次多项式模型的行驶轨迹曲线表达式如下所示：

$$[0070] \begin{cases} f(x,t) = \sum_{i=0}^5 a_i(t-t_0)^i \\ f(y,t) = \sum_{i=0}^5 b_i(t-t_0)^i \end{cases}$$

[0071] 式中， x 为智能汽车的纵向位置， y 为智能汽车的横向位置， t 为智能汽车的行驶时间， t_0 为智能汽车的超车起始时间， $f(x,t)$ 为智能汽车的纵向位置与行驶时间的函数关系， $f(y,t)$ 为智能汽车的横向位置与行驶时间的函数关系， a_i 为智能汽车纵向位置的五次多项式系数， b_i 为智能汽车横向位置的五次多项式系数。

[0072] 本实施例中，对五次多项式曲线横向位移求解一阶和二阶导数，获得五次多项式模型的横向速度与横向加速度变化规律，表达式为：

$$[0073] \dot{f}(y,t) = 5a_5(t-t_0)^4 + 4a_4(t-t_0)^3 + 3a_3(t-t_0)^2 + 2a_2(t-t_0) + a_1$$

$$[0074] \ddot{f}(y,t) = 20a_5(t-t_0)^3 + 12a_4(t-t_0)^2 + 6a_3(t-t_0) + 2a_2$$

[0075] 将智能汽车在换道前后 t_0 和 t_f 两个时刻的车辆状态 S 定义为：

$$[0076] S = [f(y,t_0) \quad \dot{f}(y,t_0) \quad \ddot{f}(y,t_0) \quad f(y,t_f) \quad \dot{f}(y,t_f) \quad \ddot{f}(y,t_f)]$$

[0077] 五次多项式的系数 a 定义为：

$$[0078] a = [a_5 \quad a_4 \quad a_3 \quad a_2 \quad a_1 \quad a_0]$$

[0079] 因此，可计算得出五次多项式曲线的系数：

$$[0080] a = A^{-1} \cdot S$$

[0081] 其中

$$[0082] \quad A = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 2 & 0 & 0 \\ t_f^5 & t_f^4 & t_f^3 & t_f^2 & t_f & 1 \\ 5t_f^4 & 4t_f^3 & 3t_f^2 & 2t_f & 1 & 0 \\ 20t_f^3 & 12t_f^2 & 6t_f & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0083] \quad t_f = t_0 + L/v$$

[0084] 五次多项式模型有着光滑的避障曲线,同时避障曲线的曲率是连续变化的,没有突变情况发生。在智能汽车换道开始与结束处的曲率为0,能够保证智能汽车在避障前后保持直线行驶,满足了避障过程的约束条件。

[0085] 本实施例中,考虑到传统人工势场法存在目标不可达和局部最优的的不足,针对智能汽车行驶的园区道路场景,建立改进的车道内势场模型、车道间势场模型和障碍物势场模型,得到总势场模型,为作为五次多项式曲线规划的安全性评价指标做好铺垫。

[0086] (1)车道内势场模型

[0087] 在园区道路行驶时,道路往往是双向单车道,为保证行车安全,智能汽车应保持在道路右侧行驶,在躲避障碍物时,智能汽车需要向道路左侧借道超越障碍物。因此车道左侧内势场值应大于车道右侧内势场值。

[0088] 所述车道内势场模型的函数表达式如下所示:

$$[0089] \quad P_{road} = \begin{cases} A_{road1} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road1})^2}{2\sigma_{road1}^2}\right), & y_{road1} < y(t) < y_{road1} + L_{width} / 2 \\ A_{road2} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road2})^2}{2\sigma_{road2}^2}\right), & y_{road1} + L_{width} / 2 < y(t) < y_{road1} + L_{width} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

[0090] 式中, P_{road} 为车道内势场值, A_{road1} 为车道右侧内势场增益系数, A_{road2} 为车道左侧内势场增益系数, $y(t)$ 为智能汽车在t时刻的横向坐标, y_{road1} 为车道右侧的横向坐标, y_{road2} 为车道左侧的横向坐标, σ_{road1} 为车道右侧内势场形状系数, σ_{road2} 为车道左侧内势场形状系数, L_{width} 为车道宽度。

[0091] (2)车道间势场模型

[0092] 车辆行驶时,一般保持在车道中心线行驶,前方无障碍物时,智能汽车在道路右侧车道保持行驶,前方出现障碍物需要超越时,智能汽车向左侧变更车道,超越障碍物的过程中也应在道路左侧保持直线行驶。因此应设立车道间势场模型,当智能汽车在车道中心线行驶时,车道间势场值较低,随着与车道中心线偏移距离的增大,车道间势场值应迅速提升。

[0093] 所述车道间势场模型的函数表达式如下所示：

$$[0094] \quad P_{mid} = \begin{cases} A_{mid1} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road1})^2}{2\sigma_{mid1}^2}\right), & y_{road1} < y(t) < y_{road1} + L_{width} / 2 \\ A_{mid2} \exp\left(\frac{(y(t) - y_{road2})^2}{2\sigma_{mid2}^2}\right), & y_{road1} + L_{width} / 2 < y(t) < y_{road1} + L_{width} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

[0095] 式中, P_{mid} 为车道间势场值; A_{mid1} 为右侧车道间势场增益系数, A_{mid2} 为左侧车道间势场增益系数, y_{road1} 为右侧车道边缘线横向坐标, y_{road2} 为左侧车道边缘线横向坐标, σ_{mid1} 为右侧车道间势场形状系数, σ_{mid2} 为左侧车道间势场形状系数, L_{width} 为车道宽度。

[0096] (3)在道路前方若存在静止或低速行驶的障碍物,智能汽车应从道路左侧超越该障碍物,为保证安全避障,因此应建立障碍物势场模型。采用椭圆形障碍物势场函数,在障碍物所在的位置处势场值最高,随着远离障碍物,在障碍物所在位置的纵向和横向的势场值逐渐降低。

[0097] 所述障碍物势场模型的函数表达式如下所示：

$$[0098] \quad P_{obstacle} = A_{obstacle} \exp\left(-\left(\frac{(x(t) - x_{obstacle}(t))^2}{2\sigma_{obstacle1}^2} + \frac{(y(t) - y_{obstacle}(t))^2}{2\sigma_{obstacle2}^2}\right)^c\right)$$

[0099] 式中, $P_{obstacle}$ 为障碍物的势场值, $A_{obstacle}$ 为障碍物的势场增益系数, $x(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的纵向坐标, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, $x_{obstacle}(t)$ 为障碍物在 t 时刻的纵向坐标, $y_{obstacle}(t)$ 为障碍物在 t 时刻的横向坐标, $\sigma_{obstacle1}$ 为椭圆形障碍物势场的横向系数, $\sigma_{obstacle2}$ 为椭圆形障碍物势场的纵向系数, c 为椭圆形障碍物势场的指数系数。

[0100] (4)总势场模型

[0101] 智能汽车行驶在道路场景中受到的总势场是由车道内势场、车道间势场以及多个障碍物共同作用的障碍物势场的总和。智能汽车所受的总势场值代表着行车安全性的高低,总势场值较低意味着该位置较为安全,总势场值越高说明在该位置发生危险的可能性越大。

[0102] 总势场模型的函数表达式如下所示：

$$[0103] \quad P_{all} = P_{road} + P_{mid} + \sum_{i=1}^n P_{obstacle}$$

[0104] 式中, P_{all} 为智能汽车在道路场景中所受的总势场值, n 为障碍物的数量, P_{road} 为车道内的势场值, P_{mid} 为车道间势场值, $P_{obstacle}$ 为障碍物的势场值。

[0105] 本实施例中,障碍物的位置为 $x_{obstacle} = 15$ 、 $y_{obstacle} = 1.75$ 。

[0106] 在道路左右边界处势场值较大,保证智能汽车在行车过程中不冲出车道;道路的右侧部分势场值小于道路左侧部分的势场值,使智能汽车尽可能在道路的右侧行驶,保证行车安全;在道路中间处势场值稍大,保证智能汽车在道路前方无障碍物时能够沿车道保持直线行驶,当道路前方存在障碍物时,势场值不是太大智能汽车可以自由向左侧道路借

道从而超越障碍物；在障碍物位置处势场值很大，随着远离障碍物势场值逐渐降低，保证智能汽车能够实现安全避障。

[0107] 综上所述，根据道路场景总势场得到的总势场模型符合真实的行车环境，确保智能汽车在园区道路中安全地规避障碍物。

[0108] 3-2) 采用矩形碰撞检测法，剔除候选轨迹簇集合中的潜在碰撞轨迹簇，具体步骤如下：

[0109] b-1) 首先将智能汽车与障碍物的俯视图简化为矩形模型，判断在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点是否会处于障碍物对应的矩形内；

[0110] b-2) 若在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点会处于障碍物对应的矩形内，则从候选轨迹簇集合中剔除该候选轨迹簇，即将该避障过程对应的候选轨迹簇作为潜在碰撞轨迹簇从候选轨迹簇集合中剔除；

[0111] b-3) 若在避障过程中智能汽车对应的矩形顶点不会处于障碍物对应的矩形内，则保留该该候选轨迹簇在候选轨迹簇集合中。

[0112] 本实施例中，被控智能汽车用矩形 $A_E B_E C_E D_E$ 表示，避障过程中的 t 时刻用矩形 $A_{Et} B_{Et} C_{Et} D_{Et}$ 表示，车长为 L_E ，车宽为 W_E ；前方障碍物为一辆汽车，用矩形 $A_N B_N C_N D_N$ 表示，车长为 L_N ，车宽为 W_N ；道路在全局坐标系下方向角为 θ_R 。若实现智能汽车在避障过程中不与障碍物发生碰撞，需满足矩形 $A_{Et} B_{Et} C_{Et} D_{Et}$ 与矩形 $A_N B_N C_N D_N$ 在任意时刻无交集，即：

$$[0113] \quad H^L(t_j) \cap T_i(t_j) = \emptyset$$

[0114] 式中， $H^L(t_j)$ 和 $T_i(t_j)$ 分别表示为障碍物和智能汽车的行驶空间。

[0115] 简化障碍物的行驶轨迹，假定智能汽车避障过程中前方障碍物保持直线行驶。智能汽车E在 t 时刻矩形四个顶点的位置和航向角的计算公式如下：

$$[0116] \quad \begin{vmatrix} A_{Et}(x) & A_{Et}(y) \\ B_{Et}(x) & B_{Et}(y) \\ C_{Et}(x) & C_{Et}(y) \\ D_{Et}(x) & D_{Et}(y) \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} L_E & W_E & 0 & 0 \\ L_E & -W_E & 0 & 0 \\ -L_E & -W_E & 0 & 0 \\ -L_E & W_E & 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \cos(\theta_R + \varphi_t) & \cos(\theta_R + \varphi_t) \\ -\sin(\theta_R + \varphi_t) & \sin(\theta_R + \varphi_t) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} E_t(x) & E_t(y) \\ E_t(x) & E_t(y) \\ E_t(x) & E_t(y) \\ E_t(x) & E_t(y) \end{vmatrix}$$

$$[0117] \quad \varphi_t = \arctan \frac{E_{t+\Delta t}(y) - E_t(y)}{E_{t+\Delta t}(x) - E_t(x)}$$

[0118] 式中， $A_{Et}(x)$ 、 $B_{Et}(x)$ 、 $C_{Et}(x)$ 、 $D_{Et}(x)$ 为智能汽车四个顶点在 t 时刻的横向坐标， $A_{Et}(y)$ 、 $B_{Et}(y)$ 、 $C_{Et}(y)$ 、 $D_{Et}(y)$ 为智能汽车四个顶点在 t 时刻的纵向坐标， φ_t 为智能汽车在 t 时刻的航向角， $E_t(x)$ 为智能汽车中心点避障轨迹的横向坐标， $E_t(y)$ 为智能汽车中心点避障轨迹的纵向坐标， Δt 为时间间隔。

[0119] 障碍物的位置信息由智能汽车搭载的传感器测得，障碍物中心点的表达式为：

$$[0120] \quad |N_t(x) \ N_t(y)| = |S_N \ L_N| * \begin{vmatrix} \cos(\theta_R + \theta_{ER}) & \sin(\theta_R + \theta_{ER}) \\ \sin(\theta_R + \theta_{ER}) & -\cos(\theta_R + \theta_{ER}) \end{vmatrix} + |E_t(x) \ E_t(y)|$$

[0121] 式中， $N_t(x)$ 为障碍物中心点的横向坐标， $N_t(y)$ 为障碍物中心点的纵向坐标， S_N 为由传感器测得的障碍物距离智能汽车的纵向距离， L_N 为由传感器测得的障碍物距离智能汽

车的横向距离, θ_{ER} 为智能汽车行驶方向与道路的夹角。

[0122] 同理, 障碍物N在t时刻矩形四个顶点位置的计算公式如下:

$$[0123] \quad \begin{vmatrix} A_{Nt}(x) & A_{Nt}(y) \\ B_{Nt}(x) & B_{Nt}(y) \\ C_{Nt}(x) & C_{Nt}(y) \\ D_{Nt}(x) & D_{Nt}(y) \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} L_N & W_N & 0 & 0 \\ L_N & -W_N & 0 & 0 \\ -L_N & -W_N & 0 & 0 \\ -L_N & W_N & 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \cos(\theta_R) & \cos(\theta_R) \\ -\sin(\theta_R) & \sin(\theta_R) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} N_t(x) & N_t(y) \\ N_t(x) & N_t(y) \\ N_t(x) & N_t(y) \\ N_t(x) & N_t(y) \end{vmatrix}$$

[0124] 式中, $A_{Nt}(x)$ 、 $B_{Nt}(x)$ 、 $C_{Nt}(x)$ 、 $D_{Nt}(x)$ 为障碍物四个顶点在t时刻的横坐标, $A_{Nt}(y)$ 、 $B_{Nt}(y)$ 、 $C_{Nt}(y)$ 、 $D_{Nt}(y)$ 为障碍物四个顶点在t时刻的纵坐标。

[0125] 判断智能汽车在避障过程中是否会与障碍物发生碰撞, 转换为在避障轨迹中智能汽车的矩形顶点是否出现在障碍物的矩形中。若在避障过程中出现智能汽车顶点与障碍物矩形重叠, 则该避障轨迹会出现与障碍物的碰撞; 若在避障过程中未出现智能汽车顶点与障碍物矩形的重叠, 则该避障轨迹为安全的, 不会与障碍物发生碰撞, 本实施例中, 避障过程即智能汽车的超车过程。

[0126] 本实施例中, 判定智能汽车E和障碍物N在避障过程中是否发生碰撞的具体检测步骤如下:

[0127] 步骤1: 计算智能汽车矩形四个顶点的位置坐标 $A_{Et}(x)$ 、 $B_{Et}(x)$ 、 $C_{Et}(x)$ 、 $D_{Et}(x)$ 、 $A_{Et}(y)$ 、 $B_{Et}(y)$ 、 $C_{Et}(y)$ 、 $D_{Et}(y)$ 和在t时刻的航向角 φ_t ;

[0128] 步骤2: 计算障碍物中心点的位置坐标 $N_t(x)$ 和 $N_t(y)$;

[0129] 步骤3: 计算障碍物矩形四个顶点的位置坐标 $A_{Nt}(x)$ 、 $B_{Nt}(x)$ 、 $C_{Nt}(x)$ 、 $D_{Nt}(x)$ 和 $A_{Nt}(y)$ 、 $B_{Nt}(y)$ 、 $C_{Nt}(y)$ 、 $D_{Nt}(y)$;

[0130] 步骤4: 分别计算面积 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 和 S_N ;

$$[0131] \quad S_A = (|\overrightarrow{A_E A_N} \times \overrightarrow{A_E B_N}| + |\overrightarrow{A_E B_N} \times \overrightarrow{A_E C_N}| + |\overrightarrow{A_E C_N} \times \overrightarrow{A_E D_N}| + |\overrightarrow{A_E D_N} \times \overrightarrow{A_E A_N}|) / 2$$

$$[0132] \quad S_B = (|\overrightarrow{B_E A_N} \times \overrightarrow{B_E B_N}| + |\overrightarrow{B_E B_N} \times \overrightarrow{B_E C_N}| + |\overrightarrow{B_E C_N} \times \overrightarrow{B_E D_N}| + |\overrightarrow{B_E D_N} \times \overrightarrow{B_E A_N}|) / 2$$

$$[0133] \quad S_C = (|\overrightarrow{C_E A_N} \times \overrightarrow{C_E B_N}| + |\overrightarrow{C_E B_N} \times \overrightarrow{C_E C_N}| + |\overrightarrow{C_E C_N} \times \overrightarrow{C_E D_N}| + |\overrightarrow{C_E D_N} \times \overrightarrow{C_E A_N}|) / 2$$

$$[0134] \quad S_D = (|\overrightarrow{D_E A_N} \times \overrightarrow{D_E B_N}| + |\overrightarrow{D_E B_N} \times \overrightarrow{D_E C_N}| + |\overrightarrow{D_E C_N} \times \overrightarrow{D_E D_N}| + |\overrightarrow{D_E D_N} \times \overrightarrow{D_E A_N}|) / 2$$

$$[0135] \quad S_N = |\overrightarrow{A_N B_N} \times \overrightarrow{A_N D_N}|$$

[0136] 步骤5: 判断 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 与 S_N 的大小, 若存在 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 等于 S_N , 则该避障轨迹会发生碰撞; 若对于任意 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 均大于 S_N , 则该避障轨迹安全不会发生碰撞。

[0137] 3-3) 以安全性、舒适性和换道效率为评价指标, 构建剩余的候选轨迹簇对应的多性能协同优化函数;

[0138] a) 安全性评价函数

[0139] 安全性作为行车中最重要的一项性能指标, 将避障轨迹簇离散化, 将每条避障轨迹所经过的各个位置的势场值的平均值作为安全性评价指标, 安全性评价函数为:

$$[0140] \quad E^i_{safety} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{all}(x, y) \quad i \in [1, m]$$

[0141] 式中, E^i_{safety} 为第 i 条轨迹的安全性评价指标, n 为将避障轨迹离散化后的位置数量, m 为避障轨迹簇中避障轨迹的数量, $P_{all}(x, y)$ 为 (x, y) 位置处的势场值。

[0142] 在道路上行车时还应考虑限制性条件, 如行驶车速不得高于最大允许车速, 车辆不可驶出道路等。

$$[0143] \quad \begin{cases} 0 < y(t) < w \\ 0 < \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} < v_{max} \end{cases}$$

[0144] 式中, $y(t)$ 为车辆所在的横向坐标, $v_x(t)$ 为车辆的纵向车速, $v_y(t)$ 为车辆的横向车速, v_{max} 为最高允许车速, w 为道路宽度。

[0145] b) 舒适性评价函数

[0146] 车辆行驶过程中产生的横纵向加速度和横纵向加速度变化率对乘坐舒适性影响巨大, 应将横纵向加速度和横纵向加速度变化率控制在合理的范围内, 否则乘客容易产生晕车等问题。

$$[0147] \quad \begin{cases} |a_x| < a_{x,max} \\ |a_y| < a_{y,max} \\ |j_x| < j_{x,max} \\ |j_y| < j_{y,max} \end{cases}$$

[0148] 式中, $a_{x,max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度, $a_{y,max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度; $j_{x,max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度变化率, $j_{y,max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度变化率。

[0149] 舒适性评价函数定义如下:

$$[0150] \quad E_{com} = w_1 \int_0^{t_f} j_x^2(\tau) d\tau + w_2 \int_0^{t_f} j_y^2(\tau) d\tau$$

[0151] 式中, E_{com} 为舒适性评价指标; t_f 为避障时长; j_x 为车辆的纵向加速度变化率, j_y 为车辆的横向加速度变化率; w_1 为纵向加速度变化率的权重, w_2 为横向加速度变化率的权重。

[0152] c) 换道效率评价函数

[0153] 在园区场景中道路大多为双向单车道, 智能汽车在行驶过程中在道路右侧保持直线行驶, 当前方存在障碍物时, 智能汽车需向道路左侧借道超越障碍物, 因此避障时间应尽可能得短, 减少因智能汽车避障而造成的对其它交通参与者的影响。换道效率评价函数定义为:

$$[0154] \quad E_{eff} = t_f$$

[0155] 式中, E_{eff} 为换道效率评价指标。

[0156] 采用平衡优化器算法, 或者麻雀搜索算法计算各个候选轨迹簇对应的多性能协同

优化函数的函数值均可,将函数值最小的多性能协同优化函数作为关于避障时长 t_f 求解的优化目标函数。

[0157] 本实施例中,通过平衡优化器算法计算各个候选轨迹簇对应的多性能协同优化函数值的具体步骤如下:

[0158] c-1) 根据平衡优化器算法在仿真软件(如MATLAB等)内建立平衡优化器算法工具箱;

[0159] c-2) 调用平衡优化器算法工具箱,设置平衡优化器算法参数,所述平衡优化器算法参数包括种群数量、维度、最大迭代次数,并按照候选轨迹簇集合中的各个候选轨迹簇对应的避障时长设置上边界与下边界;

[0160] c-3) 将多性能协同优化函数的函数值作为优化变量不断迭代优化,从而获得函数值最小的多性能协同优化函数。

[0161] 3-4) 将函数值最小的多性能协同优化函数对应的候选轨迹作为最优避障轨迹,即多性能协同优化函数的函数值最小时,输出避障时长 t_f ,该避障时长所对应的避障轨迹即为综合最优的避障轨迹。

[0162] 本实施例中,所述函数值最小的多性能协同优化函数的表达式如下所示:

$$\min E(t_f) = w_1 \frac{\int_0^{t_f} j_x^2(t) dt}{j_{x,\max} a_{x,\max}} + w_2 \frac{\int_0^{t_f} j_y^2(t) dt}{j_{y,\max} a_{y,\max}} + w_3 \frac{\sum_{i=1}^n P_{all}(x, y)}{n} + w_4 \frac{t_f}{kw}$$

[0163] s. t.

$$[0164] \begin{cases} 0 < y(t) < w \\ 0 < \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} < v_{\max} \\ |a_x(t)| < a_{x,\max} \\ |a_y(t)| < a_{y,\max} \\ |j_x(t)| < j_{x,\max} \\ |j_y(t)| < j_{y,\max} \end{cases}$$

[0165] 式中, w_1 为智能汽车纵向加速度变化率的权重系数, w_2 为智能汽车横向加速度变化率的权重系数, w_3 为安全性评价指标的权重系数, w_4 为换道效率评价指标的权重系数, w 为道路宽度, t_f 为避障时长, k 为形状系数, $P_{all}(x, y)$ 为在全局坐标系下 (x, y) 位置处的势场值, $y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向坐标, $v_x(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的纵向车速, $v_y(t)$ 为智能汽车在 t 时刻的横向车速, v_{\max} 为最高允许车速, $a_x(t)$ 为智能汽车行驶过程中的纵向加速度, $a_y(t)$ 为智能汽车行驶过程中的横向加速度, $a_{x,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的纵向最大加速度, $a_{y,\max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度, $j_x(t)$ 为智能汽车行驶过程中的纵向加速度变化率, $j_y(t)$ 为智能汽车行驶过程中的横向加速度变化率, $j_{x,\max}$ 为智能汽车行驶过

程中的纵向最大加速度变化率, $j_{y, \max}$ 为智能汽车行驶过程中的横向最大加速度变化率。

[0166] 3-5) 将笛卡尔坐标系下的最优避障轨迹转化为Frenet坐标系下的避障轨迹, 将Frenet坐标系下的避障轨迹作为重新规划的避障路径, 利用Frenet坐标系解除道路曲率的限制。

[0167] 本实施例中, 按照下列公式将笛卡尔坐标系下的最优避障轨迹转化为Frenet坐标系下的避障轨迹:

$$[0168] \begin{cases} s = s_r \\ \dot{s} = \frac{v_x \cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})}{1 - \kappa_r l} \\ \ddot{s} = \frac{a_x \cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) - \dot{s}^2 [l'(\kappa_r \frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} - \kappa_r) - (\kappa_r' l + \kappa_r l')]}{1 - \kappa_r l} \\ l = \text{sign}((y_x - y_r) \cos(\theta_{\bar{r}}) - (x_x - x_r) \sin(\theta_{\bar{r}})) \sqrt{(x_x - x_r)^2 + (y_x - y_r)^2} \\ l' = (1 - \kappa_r l) \tan(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) \\ l'' = -(\kappa_r' l + \kappa_r l') \tan(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}}) + \frac{1 - \kappa_r l}{\cos^2(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} \left[\frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_{\bar{x}} - \theta_{\bar{r}})} \kappa_x - \kappa_r \right] \end{cases}$$

[0169] 式中, s 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向位移, \dot{s} 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向速度, \ddot{s} 为智能汽车在Frenet坐标系下的纵向加速度, l 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移, l' 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移对弧长的一阶导数, l'' 为智能汽车在Frenet坐标系下的横向位移对弧长的二阶导数, $\theta_{\bar{r}}$ 为参考线的方位角, $\theta_{\bar{x}}$ 为智能汽车当前位置的方位角, v_x 为智能汽车的速度, a_x 为智能汽车的加速度, κ_r 为参考线 $\bar{r}(s)$ 的曲率, κ_x 为智能汽车当前位置处的曲率, s_r 为智能汽车在笛卡尔坐标系下相对于参考线的纵向位移, κ_r' 为参考线 $\bar{r}(s)$ 的曲率 κ_r 对弧长的一阶导数。

[0170] 4) 智能汽车按重新规划的避障路径进行超车后, 继续按照理论避障路径行驶, 并重复步骤2) 至步骤3), 直到智能汽车到达目的地。

[0171] 以上所述仅为本发明的优选实施例, 并不用于限制本发明, 本领域的技术人员在不脱离本发明的精神的前提下, 对本发明进行的改动均落入本发明的保护范围。

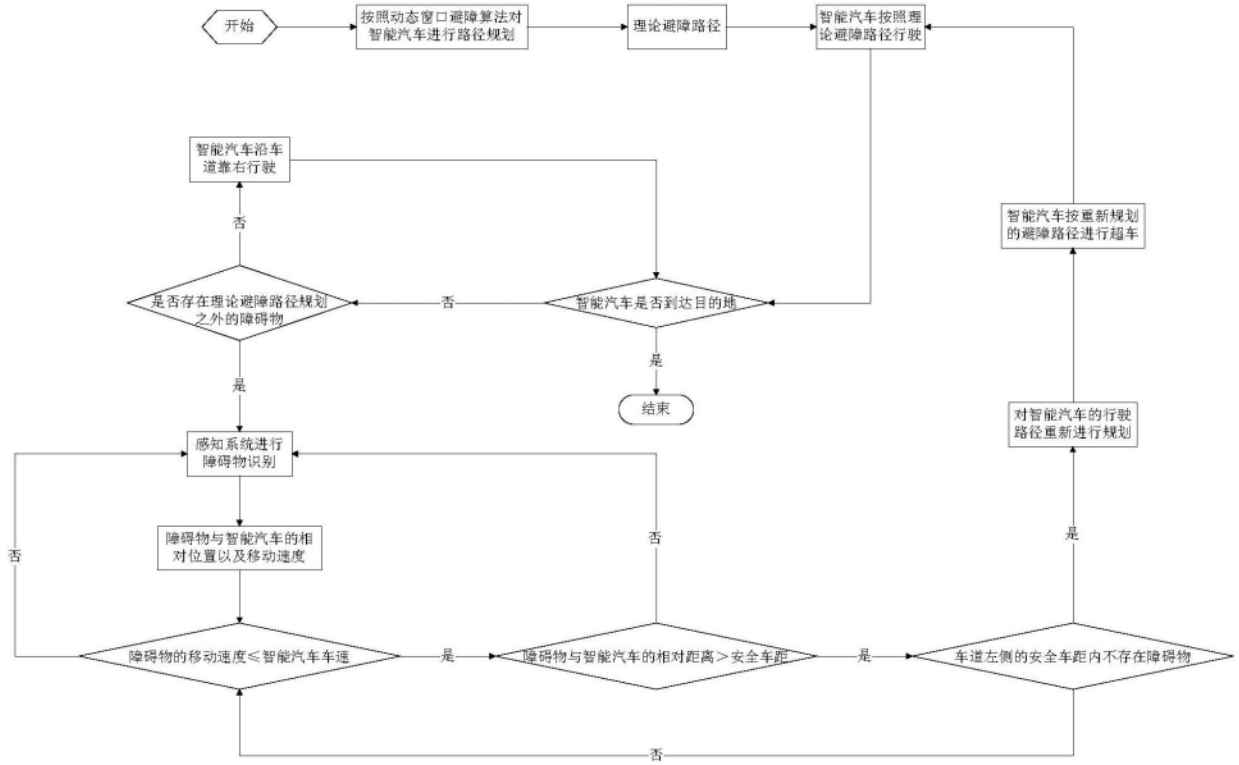


图1

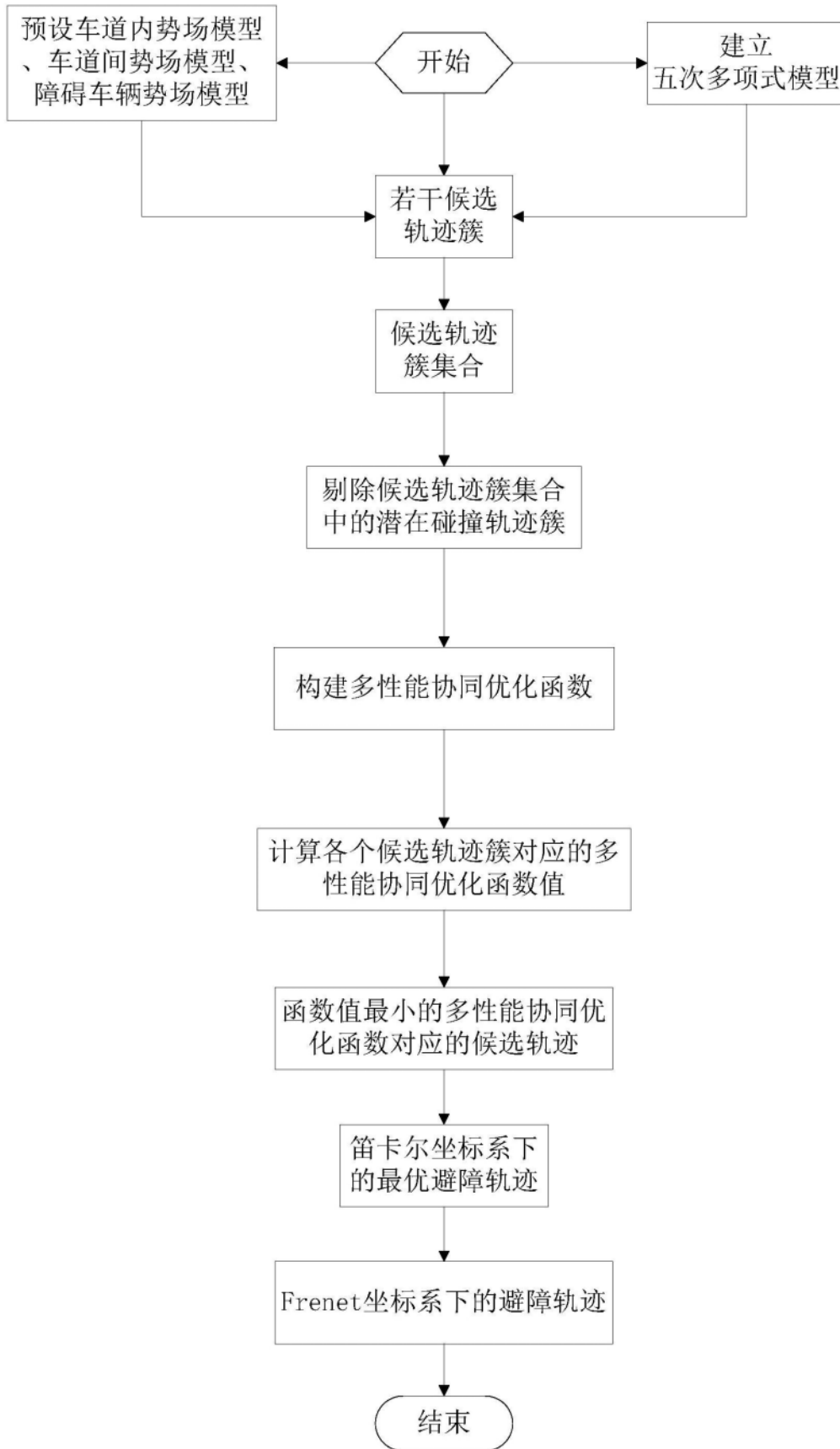


图2

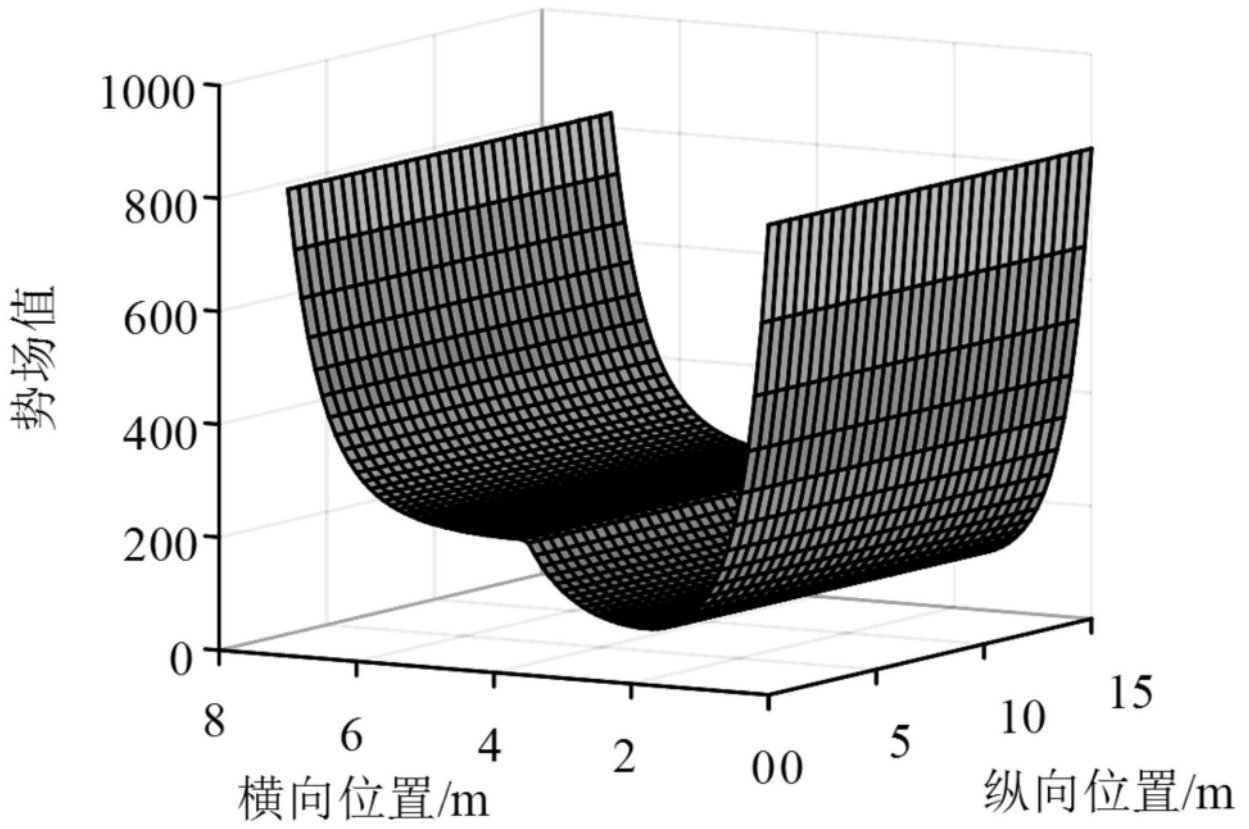


图3

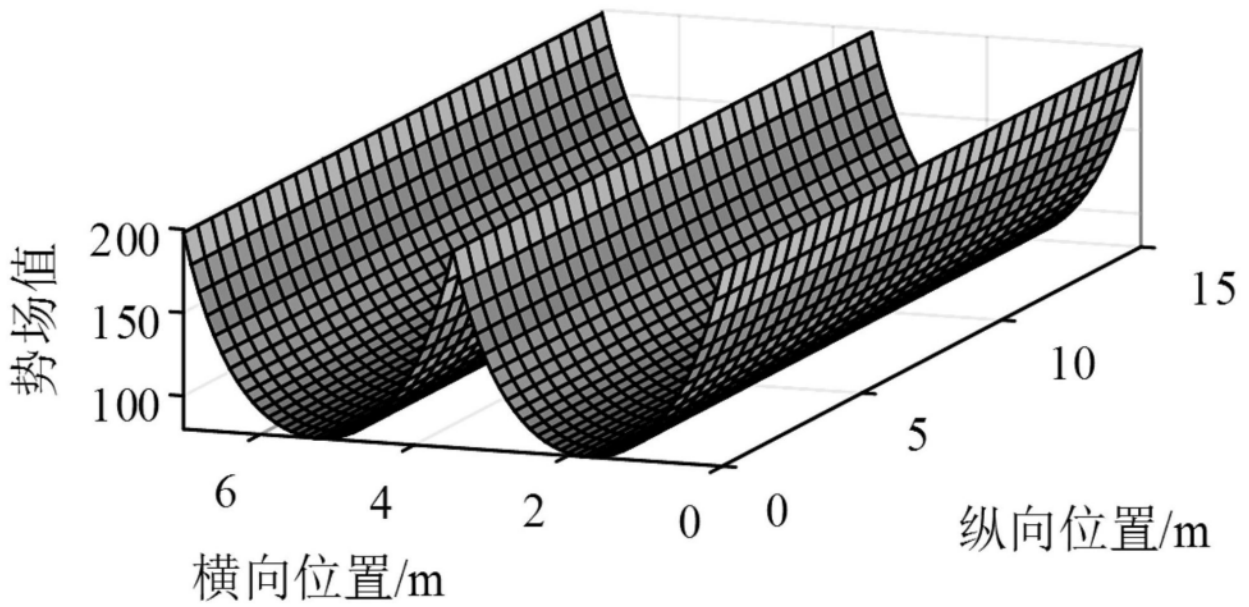


图4

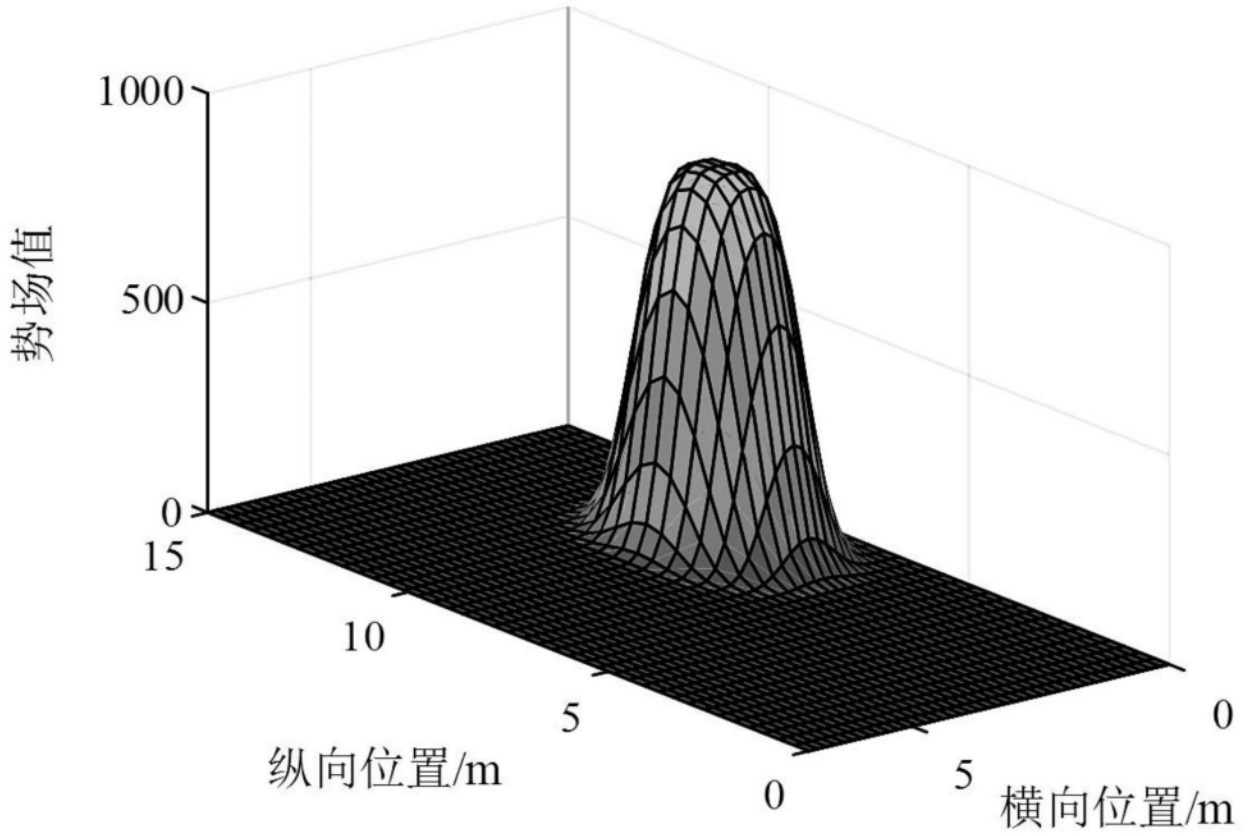


图5

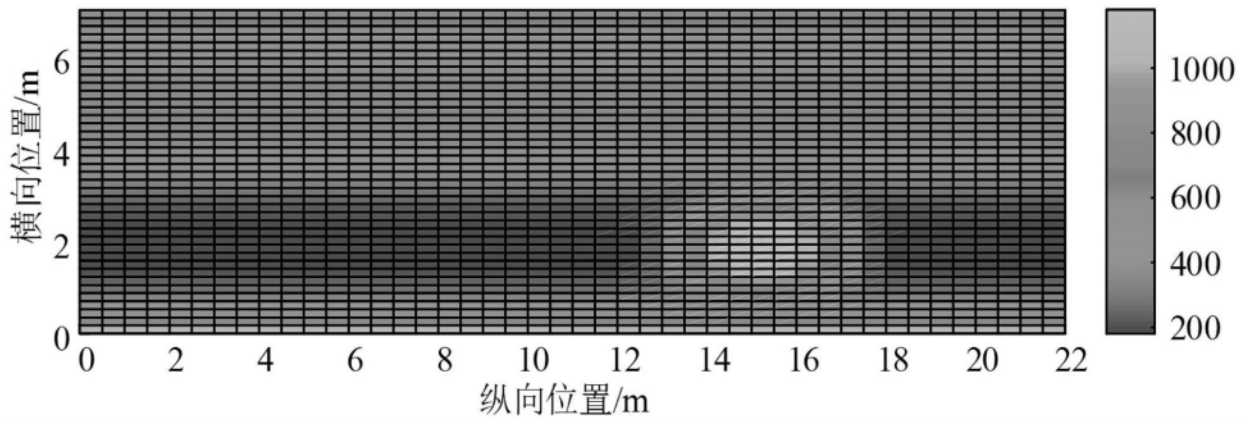


图6

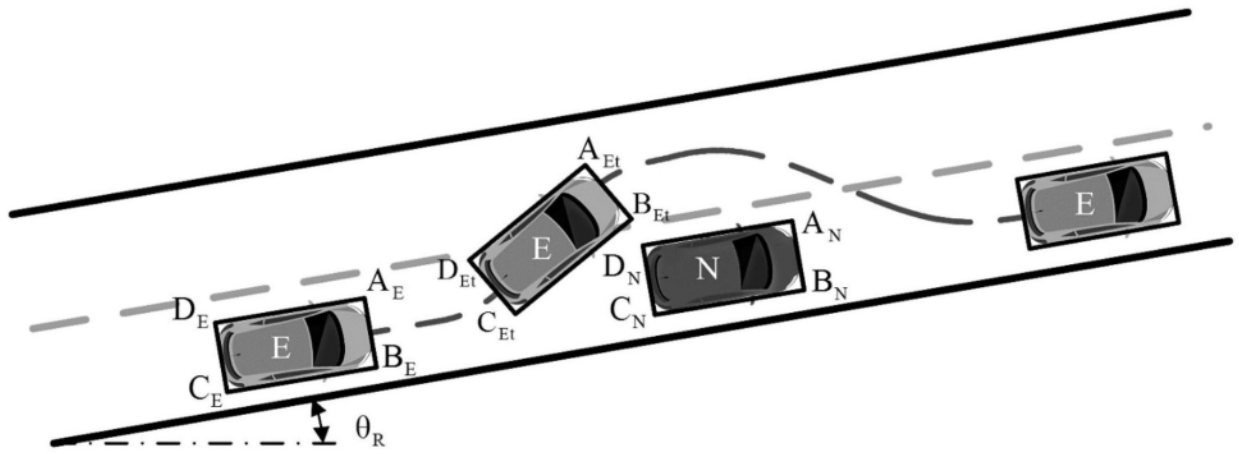


图7

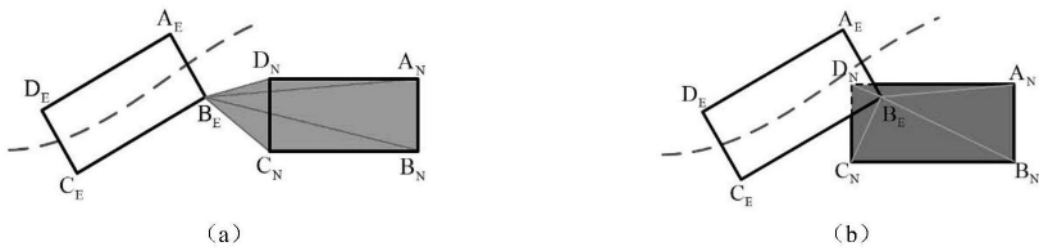


图8