



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111258323 B

(45) 授权公告日 2021. 10. 26

(21) 申请号 202010239134.4

G05B 13/04 (2006.01)

(22) 申请日 2020.03.30

审查员 李朝霞

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111258323 A

(43) 申请公布日 2020.06.09

(73) 专利权人 华南理工大学  
地址 510640 广东省广州市天河区五山路  
381号

(72) 发明人 李巍华 钟思祺

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限公司 44102  
代理人 何淑珍 江裕强

(51) Int. Cl.  
G05D 1/02 (2020.01)  
G05D 1/12 (2006.01)

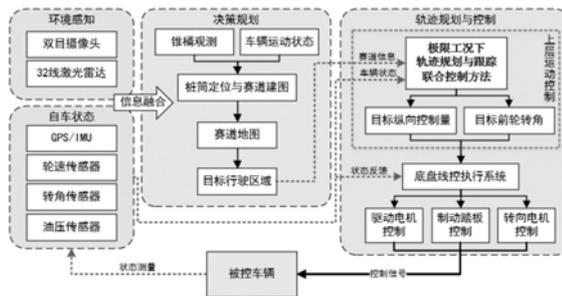
权利要求书5页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法

(57) 摘要

本发明提供了一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,包括:对道路进行参数化;建立横纵向车辆动力学模型;扩充车辆模型,并经过线性化、离散化、增量式转换,形成预测模型;进而根据模型预测控制方法,设计轨迹规划与跟踪的联合控制问题的目标函数;获取当前车辆状态,并更新预测模型中的矩阵参数;根据车辆状态与上一时刻的预测输出状态,建立道路边界、行驶稳定性、状态量约束;将问题转化为二次规划问题形式,并求解最优控制增量组合,并将最优的前轮转角 $\delta^*$ 和纵向控制值 $D^*$ 作用于自动驾驶车辆。本发明实现了最优行车线规划与控制的联合处理,降低自动驾驶模块的复杂程度,减少整体内存占用与处理时间,有助于提高自动驾驶赛车的操纵稳定性。



1. 一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1, 获取道路信息,并对其进行参数化;

S2, 建立世界坐标系与车辆坐标系,建立横纵向车辆动力学模型;

S3, 车辆模型预处理,得到车辆预测模型;

S4, 设计模型预测目标函数;

S5, 获取当前时刻T下的车辆状态  $\xi_T^{(0)}$ , 以  $\xi_T^{(0)}$  更新S3中车辆预测模型中的系数矩阵;

S6, 根据  $\xi_T^{(0)}$  和上一时刻T-1的预测输出状态  $\xi_{T-1}^*$ , 建立道路边界约束、行驶稳定性约束和状态量约束;

S7, 对目标函数和各约束进行预处理,将问题转化为二次规划问题并求解,并最终得到T+1时刻的车辆控制量;

S8, 输出车辆控制向量对智能车辆进行联合控制;

其中,步骤S3具体包括:

① 扩充车辆动力学模型,建立车辆状态与参考路径的关系;扩充后的车辆动力学模型表示为:

$$\dot{X} = v_x \cos(\varphi) - v_y \sin(\varphi)$$

$$\dot{Y} = v_x \sin(\varphi) + v_y \cos(\varphi)$$

$$\dot{\varphi} = r$$

$$\dot{v}_x = (F_x - F_{f,y} \sin(\delta) + mv_y r) / m$$

$$\dot{v}_y = (F_{r,y} + F_{f,y} \cos(\delta) - mv_x r) / m$$

$$\dot{r} = (F_{f,y} l_f \cos(\delta) - F_{r,y} l_r) / I_z$$

$$\dot{s} = v_s$$

其中状态变量为  $x = [X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s]^T$ , 输入为  $u = [D, \delta, v_s]^T$ , 该动力学模型简化表示

为  $\dot{x} = f_{est}(x, u)$ ;

② 模型线性化: 选择线性化参考点,将模型在所述线性化参考点处泰勒公式展开;

③ 模型离散化;

④ 将控制量转换成控制增量的形式;

经①~④预处理后,得到的车辆预测模型如下:

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix}$$

$$\xi(k+1) = \tilde{A}_d \xi(k) + \tilde{B}_d \Delta u(k) + \tilde{G}_d$$

其中, X, Y 分别为车辆质心在世界坐标系中的坐标,  $\varphi$  为车身航向角; m 为整车质量、 $I_z$  为转动惯量;  $v_x, v_y$  分别为车辆纵向、横向速度; r 为横摆角速度;  $F_{f,y}, F_{r,y}$  分别为前轮、后轮侧偏力, 通过等效轮胎模型转换成与侧偏角  $\alpha$  的线性关系;  $\delta$  为前轮转角;  $l_f, l_r$  分别为车辆质心到

前轴、后轴的距离; $F_x$ 为纵向合外力, $\tilde{A}_d, \tilde{B}_d$ 为与线性化参考点有关的系数矩阵, $\tilde{G}_d$ 为与参考点有关的常数矩阵;系统状态量为 $\xi = [X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s, D, \delta, v_s]^T$ ,表示车辆状态与控制量状态,控制量为 $\Delta u = [\Delta D, \Delta \delta, \Delta v_s]^T$ ,表示控制增量,其中,系统状态量、控制量后的括号“( )”表示“时刻”, $x(k)$ 表示k时刻下车辆模型的状态, $u(k-1)$ 表示k-1时刻下车辆模型的控制量状态, $\xi(k)$ 表示由k时刻下预测模型的状态, $D$ 为纵向控制量, $s$ 为当前路程, $\dot{s}$ 为 $s$ 的导数, $v_s$ 为路程速度;

步骤S4中所述目标函数如下:

$$J = -p \left( s^{(N_p)} - s^{(0)} \right) + \sum_{k=1}^{N_p} \|e_l^{(k)}\|_Q^2 + \sum_{k=1}^{N_p} \|\Delta u^{(k)}\|_R^2$$

式中,等号右边第一项为在预测周期末第 $N_p$ 步,即 $k=N_p$ 时车辆运行的路程增量 $\Delta s$ ,第二项表示对等效纵向误差 $e_l$ 的惩罚,第三项表示对控制增量 $\Delta u$ 的惩罚; $N_p$ 为模型预测控制计算步长, $p, Q, R$ 分别表示各个指标的权重, $s$ 为当前路程;

其中,所述扩充车辆动力学模型,具体包括:

①定义当前距离车辆最近的路径点为最近点,定义该最近点的路程 $s_c$ 为最近点路程 $s_n$ ;在状态量中引入当前路程 $s$ ,表示当前车辆在参考路径上行进的距离;

②在控制量中引入路程速度 $v_s$ ,定义为当前路程 $s$ 对时间的导数,即 $v_s = \frac{ds}{dt}$ ,表示车辆按照参考路径的路程方向上的运行速度;

③定义等效纵向误差 $e_{lon}^k$ ,为简便记为 $e_l^k$ :

$$e_l^k = -\cos(\varphi_{ref}(s^k))(X^k - X_{ref}(s^k)) - \sin(\varphi_{ref}(s^k))(Y^k - Y_{ref}(s^k))$$

其中, $X, Y$ 为车辆当前位置坐标, $X_{ref}(s), Y_{ref}(s)$ 为参考路径在路程 $s$ 处的路径点坐标, $\varphi_{ref}(s)$ 为参考路径在路程 $s$ 处的航向角;各变量的右上角标表示时刻,以 $k$ 表示当前,等效纵向误差 $e_l^k$ 表示当前状态 $x^k$ 中路程 $s^k$ 与最近点路程 $s_n^k$ 的相近程度。

2. 根据权利要求1所述的一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于,步骤S1具体包括:

①通过智能车辆的感知、建图模块,获取目标道路的两侧边界信息,以离散的坐标点表示;

②将道路两侧边界点按照距离两两配对,获取离散的道路中心线点集 $P$ ;定义路程 $s_c$ 为路径上任一点到起点的路径曲线总长度,起点处 $s_c=0$ ,其中,下标 $c$ 表示路径中心线;通过 $s_c$ 对 $P$ 进行三次样条插值计算,分别得出世界坐标 $X_c(s_c), Y_c(s_c)$ 和航向角 $\varphi_c(s_c)$ ,即获得道路中心点连续轨迹 $f_c(s_c)$ ,

③计算中心线各路程 $s_c$ 处对应的道路边界点的坐标 $X_l(s), Y_l(s), X_r(s), Y_r(s)$ ,完成对赛道中线与边界的参数化,其中,坐标下标表示路径点位置, $c, l, r$ 分别为中线、道路左边

界、道路右边界。

3. 根据权利要求1所述的一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于,步骤S2中所述横纵向车辆动力学模型如下:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= v_x \cos(\varphi) - v_y \sin(\varphi) \\ \dot{Y} &= v_x \sin(\varphi) + v_y \cos(\varphi) \\ \dot{\varphi} &= r \\ \dot{v}_x &= \frac{1}{m} (F_x - F_{f,y} \sin(\delta) + m v_y r) \\ \dot{v}_y &= \frac{1}{m} (F_{r,y} + F_{f,y} \cos(\delta) - m v_x r) \\ \dot{r} &= \frac{1}{I_z} (F_{f,y} l_f \cos(\delta) - F_{r,y} l_r)\end{aligned}$$

其中,  $F_x = C_m D - C_f - C_w (v_x)^2$

式中,  $X, Y$  分别为车辆质心在世界坐标系中的坐标,  $\varphi$  为车身航向角;  $m$  为整车质量、 $I_z$  为转动惯量;  $v_x, v_y$  分别为车辆纵向、横向速度;  $r$  为横摆角速度;  $F_{f,y}, F_{r,y}$  分别为前轮、后轮侧偏力, 通过等效轮胎模型转换成与侧偏角  $\alpha$  的线性关系;  $\delta$  为前轮转角;  $l_f, l_r$  分别为车辆质心到前轴、后轴的距离;  $F_x$  为纵向合外力,  $C_m, C_f, C_w$  为车辆参数, 通过标定获得,  $D$  为纵向控制量。

4. 根据权利要求1所述的一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于: 将上一时刻所解预测状态  $\xi_{r-1}^*$  的时间对应点选择为所述线性化参考点。

5. 根据权利要求1所述的一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于,步骤S6中,

所述道路边界约束, 将道路边界转化为可线性表示的可行驶区域, 具体为: 对于每一个预测状态, 获取车辆位置与路径中心线上的最近点, 将该点处的切线即航向角方向分别平移至该点对应的两侧道路边界点上, 两相互平行的切线之间形成一个平面可行驶区域, 形成对该预测状态  $\xi$  的线性约束  $H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)}$ , 即为道路边界约束; 其中  $H_{env}^{(k)}$  为对状态  $\xi$  的坐标加权矩阵,  $G_{env}^{(k)}$  为上下边界矩阵;

所述行驶稳定性约束包括对滑移稳定性约束和轮胎极限约束, 并转化成线性不等式约束  $H_{sh}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{sh}^{(k)}$ ; 其中,  $H_{sh}^{(k)}$  为稳定状态加权矩阵,  $G_{sh}^{(k)}$  为稳定状态边界矩阵;

所述状态量约束包括对状态量  $\xi^{(k)}$  和控制增量  $\Delta u^{(k)}$  的约束:  $|\xi^{(k)}| \leq \xi_{max}, |\Delta u^{(k)}| \leq \Delta u_{max}$ ,  $\xi_{max}$  为各状态量的极限值向量,  $\Delta u_{max}$  为各控制增量的极限值向量。

6. 根据权利要求5所述的一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于,所述滑移稳定性约束, 对车辆模型中的横向动力学部分进行分析, 绘制  $v_y - r$  的相轨迹图, 并根据相轨迹图中的发散区域, 得到车辆的滑移稳定性区域, 具体为:

$$\begin{cases} -r_{\max} \leq r \leq r_{\max} \\ -\alpha_{peak} \leq \frac{v_y - l_r r}{v_x} \leq \alpha_{peak} \\ -\alpha_{peak} \leq \frac{v_y + l_f r}{v_x} - \delta \leq \alpha_{peak} \end{cases}$$

其中,第一式表示在稳态转向时,轮胎力饱和情况下的极限航向角变化率,即极限横摆角速度 $r_{\max} = \frac{\mu g}{v_x}$ ;第二式是对极限后轮侧偏角 $\alpha_{peak}$ 的约束;第三式为对前轮侧偏角的约束, $g$ 为重力加速度;

根据轮胎摩擦圆,所述轮胎极限约束为:

$$(a_x)^2 + (a_y)^2 \leq (g\mu)^2$$

其中 $a_x, a_y$ 分别为车辆质心处的纵向、横向加速度, $\mu$ 为路面摩擦系数, $v_x, v_y$ 分别为车辆纵向、横向速度, $r$ 为横摆角速度, $l_f, l_r$ 分别为车辆质心到前轴、后轴的距离, $\delta$ 为前轮转角。

7. 根据权利要求6所述的一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,其特征在于,步骤S7具体包括:

①将目标函数在“线性化参考点”处线性化,与S2中线性化方法一致;并转化为二次规划问题目标函数的形式;

②建立二次规划问题的约束,具体为:

$$\xi^{(0)} = \xi_{\text{measure}} \quad (a)$$

$$\xi^{(k)} = \tilde{A}_d \xi^{(k-1)} + \tilde{B}_d \Delta u^{(k-1)} + \tilde{G}_d \quad (b)$$

$$H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)} \quad (c)$$

$$H_{sh}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{sh}^{(k)} \quad (d)$$

$$\underline{\xi} \leq \xi^{(k)} \leq \bar{\xi} \quad (e)$$

$$\underline{\Delta u} \leq \Delta u^{(k)} \leq \overline{\Delta u} \quad (f)$$

其中, $k=1, \dots, N_p$

其中, $\xi^{(0)}$ 为当前车辆状态;(a)式表示当前车辆状态的测量值 $\xi_{\text{measure}}$ 作为首状态点 $\xi^{(0)}$ ;(b)式为车辆预测模型;(c)式为道路边界约束;(d)式为行驶稳定性约束;(e),(f)式为对车辆极限状态和底层执行机构的约束; $\bar{\xi}, \underline{\xi}$ 分别代表各状态量的上下界, $\overline{\Delta u}, \underline{\Delta u}$ 分别代表各控制增量的上下界, $\tilde{A}_d, \tilde{B}_d$ 为与线性化参考点有关的系数矩阵, $\tilde{G}_d$ 为与参考点有关的常数矩阵;

③求解上述二次规划问题,解得目标控制增量 $\Delta u^*$ ,包括预测时域内的多组前轮转角增量 $\Delta \delta$ 和纵向控制值增量 $\Delta D$ ,即 $\Delta u^* = [\Delta \delta^*, \Delta D^*]$ ;将 $\Delta u^*$ 的第一组 $\Delta u^*(1) = [\Delta \delta^*(1), \Delta D^*(1)]$ 叠加到当前时刻 $T$ 的车辆控制状态量 $U_T^{(0)} = [\delta_T^{(0)}, D_T^{(0)}]$ 上,得到当前最优控制量 $u^*$ ,即:

$$u^* = [\delta_T^{(0)} + \Delta\delta^*(1), D_T^{(0)} + \Delta D^*(1)]。$$

## 一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于智能汽车控制技术领域,涉及一种智能汽车运动规划与控制方法,特别是涉及一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法。

### 背景技术

[0002] 伴随着计算机信息处理技术和传感器技术的进步,自动驾驶车辆技术迅速发展,并在军事及商业应用领域取得了广泛应用与长足进步。作为对自动驾驶系统的能力检验,自动驾驶和方程式赛车融合的发展方向进一步促进了大学生方程式竞赛的发展,推动了智能驾驶行业对汽车底盘的控制能力与算法鲁棒性的进步。与自动驾驶乘用车的平稳性、安全性、舒适性的目标不同,无人驾驶方程式赛车具有独特的动力学特性和面向竞速的比赛要求。

[0003] 当赛车在已知赛道上行驶时,自动驾驶系统需执行两个重要过程——轨迹规划和轨迹追踪:轨迹规划模块将可行驶区域(赛道边界信息)规划出最优行驶线(racing line),并转化为目标路径点;轨迹跟踪模块根据目标路径与自身状态计算控制量,实现赛道行驶控制。

[0004] 轨迹规划是一类路径搜索问题,常用算法有图搜索、树搜索、智能优化算法等。Juraj Kabzan等根据当前车辆状态和运动模型,生成一系列车辆运行轨迹,并设计代价函数,通过优化方法筛选出最优的运行轨迹,作为赛车行驶线。而Paul A.Theodosis等根据赛车手驾驶经验,将赛车过弯分成三个阶段:制动入弯、最大转向、加速出弯,并表示成三段clothoid螺旋线,进一步结合附着椭圆求解螺旋线系数,得到最优行驶线,提升路径的可执行性与赛车的操控稳定性。

[0005] 在轨迹跟踪控制方法中,滑模控制、PurePursuit、LQR等方法都能在低速工况下达到较好的效果;而系统地考虑车辆的非线性动力学特性以及复杂道路条件的影响,研究中高速、大曲率工况下车辆的操控稳定性,成为轨迹跟踪方法发展的关键技术。Krisada Kritayakirana等结合根据赛车手驾驶经验的规划方法,根据道路曲率与摩擦圆,提出自动驾驶汽车在极限工况下的横纵向控制方法,保证了在追踪最佳行车线的时候,轮胎不超过附着极限。在行驶稳定性方面,Matthew Brown等从横向控制的角度提出了车辆状态的滑移稳定性区域,并通过在模型预测控制器中引入对质心侧偏角及航向角变化率的约束,将车辆保持在稳定的状态空间内。但是上述方法假设纵向速度为恒定值,仅限于横向控制。在此基础上,本文推导了考虑纵向控制的稳定性约束,将其作为非等式约束加入控制器中,使其为控制方法提供车辆稳定性保障。

[0006] 如上所述,大多数轨迹规划方法无法考虑车辆动力学,导致车辆在追踪路径时难以保持行驶稳定。另一方面,基于车辆模型,轨迹规划和轨迹追踪可以使用模型预测控制的方法处理,但尚未有方法考虑了转向稳定性与轮胎附着情况。

## 发明内容

[0007] 针对现有技术的不足,本发明提供一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,将规划与跟踪控制结合到一个问题中,使得在已知道路边界的条件下,智能汽车可以通过单个模块,实现最优路径规划与轨迹跟踪控制,并当处于轮胎-路面附着极限时,可以稳定安全行驶。

[0008] 本申请将轨迹规划和轨迹追踪两个模块的功能结合到一个优化问题中,将预测状态作为规划状态,并同时考虑稳定性约束与道路约束,求解最优控制量。如此,可以避免在规划与追踪模块分离时,所规划路径不具备动力学可执行性的问题,保证了所规划轨迹的实时更新性与可执行性;同时降低了自动驾驶模块的复杂程度,减少整体内存占用与处理时间;有助于提高智能车辆的操纵稳定性与驾驶表现。

[0009] 一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法,包括以下步骤:

[0010] S1,获取道路信息,并对其进行参数化;

[0011] S2,建立世界坐标系与车辆坐标系,建立横纵向车辆动力学模型;

[0012] S3,车辆模型预处理,得到车辆预测模型;

[0013] S4,设计模型预测目标函数;

[0014] S5,获取当前时刻T下的车辆状态  $\xi_T^{(0)}$ ,以  $\xi_T^{(0)}$  更新S3中车辆预测模型中的系数矩阵;

[0015] S6,根据  $\xi_T^{(0)}$  和上一时刻T-1的预测输出状态  $\xi_{T-1}^*$ ,建立道路边界约束、行驶稳定性约束和状态量约束;

[0016] S7,对目标函数和各约束进行预处理,将问题转化为二次规划问题并求解,并最终得到T+1时刻的车辆控制量;

[0017] S8,输出车辆控制向量对智能车辆进行联合控制。

[0018] 进一步地,步骤S1具体包括:

[0019] ①通过智能车辆的感知、建图模块,获取目标道路的两侧边界信息,以离散的坐标点表示;

[0020] ②将道路两侧边界点按照距离两两配对,获取离散的道路中心线点集P;定义路程  $s_c$  (下标c表示路径中心线)为路径上任一点到起点的路径曲线总长度,起点处  $s_c=0$ ;通过  $s_c$  对P进行三次样条插值计算,分别得出世界坐标  $X_c(s_c)$ ,  $Y_c(s_c)$  和航向角  $\varphi_c(s_c)$ ,即获得道路中心点连续轨迹  $f_c(s_c)$ 。

[0021] ③计算中心线各路程  $s_c$  处对应的道路边界点的坐标  $X_l(s)$ ,  $Y_l(s)$ ,  $X_r(s)$ ,  $Y_r(s)$ ,完成对赛道中线与边界的参数化,其中,坐标下标表示路径点位置,c,l,r分别为中线、道路左边界、道路右边界。

[0022] 进一步地,步骤S2中所述横纵向车辆动力学模型如下:

$$[0023] \quad \dot{X} = v_x \cos(\varphi) - v_y \sin(\varphi)$$

$$[0024] \quad \dot{Y} = v_x \sin(\varphi) + v_y \cos(\varphi)$$

$$[0025] \quad \dot{\varphi} = r$$

$$[0026] \quad \dot{v}_x = \frac{1}{m} (F_x - F_{f,y} \sin(\delta) + mv_y r)$$

$$[0027] \quad \dot{v}_y = \frac{1}{m} (F_{r,y} + F_{f,y} \cos(\delta) - mv_x r)$$

$$[0028] \quad \dot{r} = \frac{1}{I_z} (F_{f,y} l_f \cos(\delta) - F_{r,y} l_r)$$

[0029] 其中,  $F_x = C_m D - C_f - C_w (v_x)^2$

[0030] 式中,  $X, Y$  分别为车辆质心在世界坐标系中的坐标,  $\varphi$  为车身航向角;  $m$  为整车质量、 $I_z$  为转动惯量;  $v_x, v_y$  分别为车辆纵向、横向速度;  $r$  为横摆角速度;  $F_{f,y}, F_{r,y}$  分别为前轮、后轮侧偏力, 通过等效轮胎模型转换成与侧偏角  $\alpha$  的线性关系;  $\delta$  为前轮转角;  $l_f, l_r$  分别为车辆质心到前轴、后轴的距离;  $F_x$  为纵向合外力,  $C_m, C_f, C_w$  为车辆参数, 通过标定获得。

[0031] 进一步地, 步骤S3具体包括:

[0032] ①扩充车辆动力学模型, 建立车辆状态与参考路径的关系; 扩充后的车辆动力学模型可表示为:

$$[0033] \quad \dot{X} = v_x \cos(\varphi) - v_y \sin(\varphi)$$

$$[0034] \quad \dot{Y} = v_x \sin(\varphi) + v_y \cos(\varphi)$$

$$[0035] \quad \dot{\varphi} = r$$

$$[0036] \quad \dot{v}_x = (F_x - F_{f,y} \sin(\delta) + mv_y r) / m$$

$$[0037] \quad \dot{v}_y = (F_{r,y} + F_{f,y} \cos(\delta) - mv_x r) / m$$

$$[0038] \quad \dot{r} = (F_{f,y} l_f \cos(\delta) - F_{r,y} l_r) / I_z$$

$$[0039] \quad \dot{s} = v_s$$

[0040] 其中状态变量为  $x = [X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s]^T$ , 输入为  $u = [D, \delta, v_s]^T$ , 该动力学模型可以

简化表示为  $\dot{x} = f_{est}(x, u)$ 。

[0041] ②模型线性化: 选择线性化参考点, 将模型在所述线性化参考点处泰勒公式展开;

[0042] ③模型离散化;

[0043] ④将控制量转换成控制增量的形式;

[0044] 经上述预处理后, 得到的车辆预测模型如下:

$$[0045] \quad \xi(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix}$$

$$[0046] \quad \xi(k+1) = \tilde{A}_d \xi(k) + \tilde{B}_d \Delta u(k) + \tilde{G}_d$$

[0047] 其中,  $\tilde{A}_d, \tilde{B}_d$  为与线性化参考点有关的系数矩阵,  $\tilde{G}_d$  为与参考点有关的常数矩阵;

系统状态量为  $\xi = [X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s, D, \delta, v_s]^T$ , 表示车辆状态与控制量状态; 控制量为  $\Delta u = [\Delta D, \Delta \delta, \Delta v_s]^T$ , 表示控制增量, 其中, 状态变量、控制量后的括号“( )”表示“时刻”, 如  $x$

(k) 表示k时刻下车辆模型的状态 (包括  $[X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s]^T$ ),  $u(k-1)$  表示k-1时刻下车辆模型的控制量状态 (包括  $[D, \delta, v_s]^T$ ), 则  $\xi(k)$  表示由k时刻下预测模型的状态 (由  $x(k)$ ,  $u(k-1)$  组成)。

[0048] 进一步地, 所述扩充车辆动力学模型, 具体包括:

[0049] ①定义当前距离车辆最近的路径点为最近点 (Nearest Point), 进一步地, 定义该最近点的路程  $s_c$  为最近点路程  $s_n$ , 在状态量中引入当前路程  $s$ , 表示当前车辆在参考路径上行进的距离 (路程);

[0050] ②在控制量中引入路程速度  $v_s$ , 定义为当前路程  $s$  对时间的导数, 即  $v_s = \frac{ds}{dt}$ , 表示车辆按照参考路径的路程方向上的运行速度;

[0051] ③定义等效纵向误差  $e_{lon}^k$  (为简便记为  $e_l^k$ ):

$$[0052] \quad e_l^k = -\cos(\varphi_{ref}(s^k))(X^k - X_{ref}(s^k)) \\ -\sin(\varphi_{ref}(s^k))(Y^k - Y_{ref}(s^k))$$

[0053] 其中,  $X, Y$  为车辆当前位置坐标,  $X_{ref}(s), Y_{ref}(s)$  为参考路径在路程  $s$  处的路径点坐标,  $\varphi_{ref}(s)$  为参考路径在路程  $s$  处的航向角; 各变量的右上角标表示时刻, 以  $k$  表示当前。等效纵向误差  $e_l^k$  表示当前状态  $x^k$  中路程  $s^k$  与最近点路程  $s_n^k$  的相近程度。

[0054] 进一步地, 将上一时刻所解预测状态  $\xi_{T-1}^*$  的时间对应点选择为所述线性化参考点。

[0055] 进一步地, 步骤S4中所述目标函数如下:

$$[0056] \quad J = -p \left( s^{(N_p)} - s^{(0)} \right) + \\ \sum_{k=1}^{N_p} \|e_l^{(k)}\|_Q^2 + \sum_{k=1}^{N_p} \|\Delta u^{(k)}\|_R^2$$

[0057] 其中, 等号右边第一项为在预测周期末 (第  $N_p$  步, 即  $k=N_p$ ) 时车辆运行的路程增量  $\Delta s$ , 第二项表示对等效纵向误差  $e_l$  的惩罚, 第三项表示对控制增量  $\Delta u$  的惩罚;  $N_p$  为模型预测控制计算步长,  $p, Q, R$  分别表示各个指标的权重。

[0058] 进一步地, 步骤S6中:

[0059] 所述道路边界约束, 将道路边界转化为可线性表示的可行驶区域, 具体为: 对于每一个预测状态, 获取车辆位置与路径中心线上的最近点, 将该点处的切线 (即航向角方向) 分别平移至该点对应的两侧道路边界点上, 两相互平行的切线之间形成一个平面可行驶区域, 形成对该预测状态  $\xi$  的线性约束  $H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)}$ , 即为道路边界约束; 其中  $H_{env}^{(k)}$  为对状态  $\xi$  的坐标加权矩阵,  $G_{env}^{(k)}$  为上下边界矩阵。

[0060] 所述行驶稳定性约束包括对滑移稳定性约束和轮胎极限约束, 并转化成线性不等式约束  $H_{sh}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{sh}^{(k)}$ ; 其中,  $H_{sh}^{(k)}$  为稳定状态加权矩阵,  $G_{sh}^{(k)}$  为稳定状态边界矩阵。

[0061] 所述状态量约束包括对状态量  $\xi^{(k)}$  和控制增量  $\Delta u^{(k)}$  的约束:  $|\xi^{(k)}| \leq \xi_{max}, |\Delta u^{(k)}| \leq \Delta u_{max}$ 。  $\xi_{max}$  为各状态量的极限值向量,  $\Delta u_{max}$  为各控制增量的极限值向量。所述行驶稳定

性约束包括对滑移稳定性约束和轮胎极限约束,并转化成线性不等式约束  $H_{sh}^{(k)} \xi(k) \leq G_{sh}^{(k)}$ ,

[0062] 所述状态量约束包括对状态量  $\xi^{(k)}$  和控制增量  $\Delta u^{(k)}$  的约束:  $|\xi^{(k)}| \leq \xi_{\max}, |\Delta u^{(k)}| \leq \Delta u_{\max}$ 。

[0063] 进一步地,所述滑移稳定性约束,对车辆模型中的横向动力学部分进行分析,绘制  $v_y-r$  的相轨迹图,并根据相轨迹图中的发散区域,得到车辆的滑移稳定性区域,具体为:

$$[0064] \quad \begin{cases} -r_{\max} \leq r \leq r_{\max} \\ -\alpha_{peak} \leq \frac{v_y - l_r r}{v_x} \leq \alpha_{peak} \\ -\alpha_{peak} \leq \frac{v_y + l_f r}{v_x} - \delta \leq \alpha_{peak} \end{cases}$$

[0065] 其中,第一式表示在稳态转向时,轮胎力饱和情况下的极限航向角变化率,即极限横摆角速度  $r_{\max} = \frac{\mu g}{v_x}$ ;第二式是对极限后轮侧偏角  $\alpha_{peak}$  的约束;第三式为对前轮侧偏角的

约束;

[0066] 根据轮胎摩擦圆,所述轮胎极限约束为:

$$[0067] \quad (a_x)^2 + (a_y)^2 \leq (g\mu)^2$$

[0068] 其中  $a_x, a_y$  分别为车辆质心处的纵向、横向加速度,  $\mu$  为路面摩擦系数。

[0069] 进一步地,步骤S7具体包括:

[0070] ①将目标函数在“线性化参考点”处线性化,与S2中线性化方法一致;并转化为二次规划问题目标函数的形式;

[0071] ②建立二次规划问题的约束,具体为:

$$[0072] \quad \xi^{(0)} = \xi_{\text{measure}} \quad (a)$$

$$[0073] \quad \xi^{(k)} = \tilde{A}_d \xi^{(k-1)} + \tilde{B}_d \Delta u^{(k-1)} + \tilde{G}_d \quad (b)$$

$$[0074] \quad H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)} \quad (c)$$

$$[0075] \quad H_{sh}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{sh}^{(k)} \quad (d)$$

$$[0076] \quad \bar{\xi}, \underline{\xi}, \leq \xi^{(k)} \leq \bar{\xi} \quad (e)$$

$$[0077] \quad \underline{\Delta u} \leq \Delta u^{(k)} \leq \overline{\Delta u}, \underline{\Delta u} \quad (f)$$

$$[0078] \quad (k=1, \dots, N_p)$$

[0079] 其中,  $\xi^{(0)}$  为当前车辆状态, (a) 式表示当前车辆状态的测量值  $\xi_{\text{measure}}$  作为首状态点  $\xi^{(0)}$ ; (b) 式为车辆预测模型; (c) 式为道路边界约束; (d) 式为行驶稳定性约束; (e), (f) 式为对车辆极限状态和底层执行机构的约束;  $\bar{\xi}, \underline{\xi}$  分别代表各状态量的上下界,  $\overline{\Delta u}, \underline{\Delta u}$  分别代表各控制增量的上下界;

[0080] ③求解上述二次规划问题,解得目标控制增量  $\Delta u^*$  (包括预测时域内的多组前轮转角增量  $\Delta \delta$  和纵向控制值增量  $\Delta D$ , 即  $\Delta u^* = [\Delta \delta^*, \Delta D^*]$ ); 将  $\Delta u^*$  的第一组  $\Delta u^*(1) = [\Delta$

$\delta^*(1), \Delta D^*(1)]$  叠加到当前时刻T的车辆控制状态量  $U_T^{(0)} = [\delta_T^{(0)}, D_T^{(0)}]$  上, 得到当前最优控制量  $u^*$ 。

[0081] 即:

$$[0082] \quad u^* = [\delta_T^{(0)} + \Delta\delta^*(1), D_T^{(0)} + \Delta D^*(1)]$$

[0083] 与现有技术相比, 本发明的有益效果为:

[0084] 1. 本发明提出的方法基于模型预测控制理论, 将智能车辆的运动规划、轨迹跟踪问题转化为统一的优化问题。相比于规划、跟踪分离的方法, 该方法可以避免所规划路径不具备动力学可执行性的问题, 保证了所规划轨迹的实时更新性与可执行性; 降低自动驾驶模块的复杂程度, 减少整体内存占用与处理时间; 有助于提高智能车辆的操纵稳定性与驾驶表现。

[0085] 2. 本发明在预测模型中引入了“等效纵向误差”, 替代了通过“投影”(即对离散路径点进行遍历, 求解距离车辆最近的路径点的过程) 求解路径参考点, 避免因“投影”操作产生的多重迭代问题, 优化了模型预测控制问题的求解过程, 较大程度地提高了求解效率。

[0086] 3. 本发明分别引入了横向滑移稳定性约束与纵向轮胎极限约束, 避免了横纵向联合控制时因附着极限导致的车辆失稳问题, 提高了自动驾驶汽车自主规划与跟踪联合控制的稳定性。

[0087] 4. 本发明建立参考路径与预测模型的关系, 通过车辆预测状态, 保证所规划轨迹在车辆动力学上的可执行性。

## 附图说明

[0088] 图1为本发明实施例的无人驾驶系统构架图。

[0089] 图2为本发明实施例的等效纵向误差示意图。

[0090] 图3为本发明实施例的线性化参考点选择方法流程示意图。

[0091] 图4为本发明实施例的第k步道路边界约束示意图。

[0092] 图5为本发明实施例的滑移稳定性约束示意图。

[0093] 图6为本发明实施例中轨迹规划与跟踪联合控制方法的流程图。

[0094] 实施方式

[0095] 为了使本发明的目的, 技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施实例, 对本发明进行进一步详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明, 并不用于限定本发明。

[0096] 为方便表述, 设当前为T时刻, 时刻信息在状态变量 $\xi$ 、解U的右下标表示。模型预测控制方法的控制周期为 $T_s$ , 预测时域(步长)为 $N_p$ , 即预测控制步数 $k \in [1, N_p]$ 。

[0097] 一种智能车辆轨迹规划与跟踪的联合控制方法可以在极限情况下使用。该方法可以应用于前轮转向的普通四轮车辆上; 如应用于道路交通环境下的乘用车时, 仅需将不含障碍物的可行驶区域作为道路信息, 即可实现联合控制。为了方便理解, 本实施例提供的联合控制方法应用于自动驾驶方程式赛车上, 该赛车的无人驾驶系统参见图1。

[0098] 所述方法包括以下步骤:

[0099] S1: 获取道路的边界信息, 并对其进行参数化: 通过道路中心线与两侧边界的离散

坐标点 $X_c(s), Y_c(s), X_l(s), Y_l(s), X_r(s), Y_r(s)$ 表示,具体为:

[0100] ①通过智能车辆的感知、建图模块,获取目标道路的两侧边界信息,以离散的坐标点表示;

[0101] ②将道路两侧边界点按照距离两两配对,获取离散的道路中心线点集P;定义路程 $s_c$ (下标c表示路径中心线)为路径上任一点到起点的路径曲线总长度,起点处 $s_c=0$ ;通过 $s_c$ 对P进行三次样条插值计算,分别得出世界坐标 $X_c(s_c), Y_c(s_c)$ 和航向角 $\varphi_c(s_c)$ ,即获得道路中心点连续轨迹 $f_c(s_c)$ 。

[0102] ③计算中心线各路程 $s_c$ 处对应的道路边界点的坐标 $(X_c(s), Y_c(s), X_l(s), Y_l(s), X_r(s), Y_r(s))$ 。其中,坐标下标表示路径点位置,c,l,r分别为中线、道路左边界、道路右边界。

[0103] S2:建立横纵向车辆动力学模型,并完成模型参数的测量与标定,所述模型如下:

$$[0104] \quad \dot{X} = v_x \cos(\varphi) - v_y \sin(\varphi)$$

$$[0105] \quad \dot{Y} = v_x \sin(\varphi) + v_y \cos(\varphi)$$

$$[0106] \quad \dot{\varphi} = r$$

$$[0107] \quad \dot{v}_x = \frac{1}{m} (F_x - F_{f,y} \sin(\delta) + m v_y r)$$

$$[0108] \quad \dot{v}_y = \frac{1}{m} (F_{r,y} + F_{f,y} \cos(\delta) - m v_x r)$$

$$[0109] \quad \dot{r} = \frac{1}{I_z} (F_{f,y} l_f \cos(\delta) - F_{r,y} l_r)$$

[0110] 其中, $X, Y$ 分别为车辆质心在世界坐标系中的坐标, $\varphi$ 为车身航向角; $m$ 为整车质量、 $I_z$ 为转动惯量; $v_x, v_y$ 分别为车辆纵向、横向速度; $r$ 为横摆角速度; $F_{f,y}, F_{r,y}$ 分别为前轮、后轮侧偏力; $\delta$ 为前轮转角; $l_f, l_r$ 分别为车辆质心到前轴、后轴的距离;纵向合外力 $F_x, F_x = C_m D - C_f - C_w (v_x)^2$ ,  $C_m, C_f, C_w$ 为车辆参数,通过标定获得。(世界坐标的方向遵循世界坐标系ENU规定, $v_x, v_y, r$ 遵循车身坐标系FLU规定,轮胎侧向力、纵向力的方向遵循轮胎坐标系规定。)

[0111] 采用Pacejka的Brush轮胎模型,并作小侧偏角、小侧向加速度假设,将其简化为等效侧偏刚度 $\bar{C}_\#$ 与侧偏角 $\alpha_\#$ 的线性模型:

$$[0112] \quad \begin{cases} F_{f,y} \approx \bar{C}_f \alpha_f \approx \bar{C}_f \left( \frac{v_y + l_f r}{v_x} - \delta \right) \\ F_{r,y} \approx \bar{C}_r \alpha_r \approx \bar{C}_r \frac{v_y - l_r r}{v_x} \end{cases}$$

[0113] 式中, $\bar{C}_f, \bar{C}_r$ 为前、后轮的等效侧偏刚度。 $\alpha_f, \alpha_r$ 分别代表前、后轮侧偏角。

[0114] 对 $m, l_f, l_r$ 等参数进行测量;根据四个车轮的载荷,估算 $I_z$ 等参数的值;根据轮胎性能曲线参数,计算 $\bar{C}_f, \bar{C}_r$ ;设计纵向控制标定实验,完成 $C_m, C_f, C_w$ 的测算。

[0115] S3:车辆模型预处理,得到车辆预测模型,所述车辆模型预处理包括:模型扩充、线性化、离散化和增量式转换,具体为:

[0116] ①扩充模型,建立车辆状态与参考路径的关系,同时避免计算最近点时的多重迭

代问题,具体为:

[0117] a) 定义当前距离车辆最近的路径点为最近点 (Nearest Point), 进一步地, 定义该最近点的路程  $s_c$  为最近点路程  $s_n$ ; 在状态量中引入当前路程  $s$ , 表示当前车辆在参考路径上行进的距离 (路程);

[0118] b) 在控制量中引入路程速度  $v_s$ , 定义为当前路程  $s$  对时间的导数, 即  $v_s = \frac{ds}{dt}$ , 表示车辆按照参考路径的路程方向上的运行速度;

[0119] c) 定义等效纵向误差  $e_{lon}^k$  (为简便记为  $e_l^k$ ):

$$[0120] \quad e_l^k = -\cos(\varphi_{ref}(s^k))(X^k - X_{ref}(s^k)) \\ -\sin(\varphi_{ref}(s^k))(Y^k - Y_{ref}(s^k))$$

[0121] 其中,  $X, Y$  为车辆当前位置坐标,  $X_{ref}(s), Y_{ref}(s)$  为参考路径在路程  $s$  处的路径点坐标,  $\varphi_{ref}(s)$  为参考路径在路程  $s$  处的航向角; 各变量的右上角标表示时刻, 以  $k$  表示当前。等效纵向误差  $e_l^k$  表示当前  $x^k$  中路程  $s$  与路径最近点  $s_n$  的相近程度, 如图2中的粗实线箭头。在目标函数中设置对  $e_l^k$  的惩罚, 保证MPC解中的  $s^{(k)}$  与  $s_n^{(k)}$  的误差较小。将  $s$  引入状态量  $x^k$ , 建立了车辆状态  $x^k$  与参考路径的关系, 便于计算各项误差; 通过计算  $v_s$  对  $s^k$  进行更新, 避免多重迭代问题。

[0122] ②线性化: 获取当前状态的线性化参考点, 并将模型线性化——在该点处泰勒公式展开, 忽略高阶项。获取线性化参考点的方法为“将上一时刻所解预测状态  $\xi_{T-1}^*$  的时间对应点作为线性化参考点”, 以下以“ $T$ 时刻”为例, 具体说明线性化参考点的获取方法:

[0123] 如图3所示: 从上一时刻 ( $T-1$ 时刻) 的解  $U_{T-1}^*$  中, 获得车辆预测状态  $\xi_{T-1}^*$  (三角形点); 在  $T$ 时刻时, 将从  $T-1$ 时刻解中的第  $k+1$  步预测状态  $(x_{T-1}^{(k+1)}, u_{T-1}^{(k+1)})$ , 作为  $T$ 时刻第  $k$  步的线性化参考点 (空心圆点), 并在预测时域  $N_p-1$  内一一对应;  $T$ 时刻第  $N_p$  步的参考点可与第  $N_p-1$  步一致。

[0124] ③使用零阶保持进行离散化;

[0125] ④将控制量转换成控制增量的形式;

[0126] 如上处理后, 得到的车辆预测模型如下:

$$[0127] \quad \xi(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix}$$

$$[0128] \quad \xi(k+1) = \tilde{A}_d \xi(k) + \tilde{B}_d \Delta u(k) + \tilde{G}_d$$

[0129] 其中,  $\tilde{A}_d, \tilde{B}_d$  为与线性化参考点有关的系数矩阵,  $\tilde{G}_d$  为与参考点有关的常数矩阵; 系统状态量为  $\xi = [X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s, D, \delta, v_s]^T$ , 表示车辆状态与控制量状态; 控制量为  $\Delta u = [\Delta D, \Delta \delta, \Delta v_s]^T$ , 表示控制增量。其中, 系统状态量、控制量后的括号“( )”表示“时刻”, 如  $x(k)$  表示  $k$ 时刻下车辆模型的状态 (包括  $[X, Y, \varphi, v_x, v_y, r, s]^T$ ),  $u(k-1)$  表示  $k-1$ 时刻下车辆模

型的控制量状态 (包括  $[D, \delta, v_s]^T$ )，则  $\xi(k)$  表示由  $k$  时刻下预测模型的状态 (由  $x(k), u(k-1)$  组成)。

[0130] S4: 根据模型预测控制方法, 建立轨迹规划与跟踪的联合控制问题, 包括:

[0131] 为了“根据已知赛道边界, 实现轨迹规划与跟踪的联合控制”, 设计模型预测目标函数为:

$$J = -p \left( s^{(N_p)} - s^{(0)} \right) + \sum_{k=1}^{N_p} \left\| e_l^{(k)} \right\|_Q^2 + \sum_{k=1}^{N_p} \left\| \Delta u^{(k)} \right\|_R^2$$

[0133] 其中, 等号右边第一项为在预测周期末 (第  $N_p$  步, 即  $k=N_p$ ) 时车辆运行的路程增量  $\Delta s$ , 第二项表示对等效纵向误差  $e_l$  的惩罚, 第三项表示对控制增量  $\Delta u$  的惩罚;  $N_p$  为模型预测控制计算步长,  $p, Q, R$  分别表示各个指标的权重, 每个指标的权重可根据实际情况赋值。

[0134] 目标函数对应如下控制目标: 在预测周期内, 使车辆在参考路径方向的运行路程  $s$  最大化, 进而达到全局行驶路径最短、圈速最快的目的; 其次, 要使等效纵向误差  $e_l^k$  的值尽量小, 保证路程  $s^k$  求解的准确性; 另外, 为减少频繁的操作、确保车辆执行机构的稳定执行, 对控制增量  $\Delta u$  进行惩罚。

[0135] S5: 经过传感器测量与滤波处理, 获取当前时刻 (相关变量以下标 “T” 表示) 下的车辆状态  $\xi_T^{(0)}$ ; 以  $\xi_T^{(0)}$  更新 S3 中预测模型的系数矩阵。

[0136] S6: 根据  $\xi_T^{(0)}$  和上一时刻 (T-1 时刻) 的预测输出状态  $\xi_{T-1}^*$ , 建立道路边界约束、行驶稳定性约束和状态量约束:

[0137] ①道路边界约束: 将道路边界转化为可线性表示的可行驶区域, 并转化成线性不等式约束  $H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)}$ 。

[0138] 建立道路边界约束的具体方法是: 对于每一个预测状态, 获取车辆位置在中心线上的最近点, 将该点处的切线分别平移至该点对应的两侧道路边界点上, 两相互平行的切线之间形成一个平面可行驶区域形成对该预测状态的线性约束, 即为道路边界约束。具体为:

[0139] 对照附图4, 过程如下, :

[0140] a) 与 S3② 中获取线性化参考点方法类似, 在形成 T 时刻第  $k$  步的道路边界约束时, 使用 T-1 时刻解出的对应预测状态点  $(x_{T-1}^{(k+1)}, u_{T-1}^{(k+1)})$  作为状态参考点  $(x_{T,esp}^{(k)}, u_{T,esp}^{(k)})$ 。根据其路程  $s_{T,esp}^{(k)}$  获取路径中线上的路径参考点, 获取对应坐标  $(X_c(s_{T,esp}^{(k)}), Y_c(s_{T,esp}^{(k)}))$  与航向角  $\varphi(s_{T,esp}^{(k)})$ 。

[0141] b) 将路径参考点处的切线平移至该点对应的 (两侧) 道路边界点上, 形成第  $k$  步的上下边界约束 (粗实线)。

[0142] c) 获取一系列预测时域内的状态参考点与路径参考点, 生成一系列的两端边界约束, 组合成为 T 时刻下的环境约束。

[0143] 因此,将道路边界约束表示不等式约束:

$$[0144] \quad H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)}$$

$$[0145] \quad H_{env}^{(k)} = \begin{bmatrix} k_{env} & 1 & \mathbf{0}_{1 \times 8} \\ -k_{env} & -1 & \mathbf{0}_{1 \times 8} \end{bmatrix}$$

$$[0146] \quad G_{env}^{(k)} = \begin{pmatrix} b_u \\ -b_l \end{pmatrix}$$

$$[0147] \quad k_{env}^{(k)} = -\frac{X_r - X_l}{Y_r - Y_l}$$

$$[0148] \quad b_u^{(k)} = \max(Y_l - kX_l, Y_r - kX_r)$$

$$[0149] \quad b_l^{(k)} = \min(Y_l - kX_l, Y_r - kX_r)$$

[0150] 其中,  $(X_l, Y_l)$ 、 $(X_r, Y_r)$  为  $T-1$  时刻的解中  $(\xi_{T-1}^{k+1}, \Delta u_{T-1}^{k+1})$  里  $s_{T-1}^{k+1}$  所对应的一组(两侧)道路边界点坐标。 $k_{env}^{(k)}$  表示可行区域的切线斜率,  $b_u, b_l$  分别表示可行区域上下界。

[0151] ②行驶稳定性约束:包括对滑移稳定性、轮胎附着极限的约束,并转化成线性不等式约束  $H_{sh}^{(k)} \xi(k) \leq G_{sh}^{(k)}$ 。具体如下:

[0152] a) 滑移稳定性约束:对车辆模型中的横向动力学部分进行分析,绘制  $v_y$ - $r$  的相轨迹图,并根据相轨迹图中的发散区域,得到车辆的滑移稳定性区域,如图5。具体为:

$$[0153] \quad \begin{cases} -r_{\max} \leq r \leq r_{\max} \\ -\alpha_{peak} \leq \frac{v_y - l_r r}{v_x} \leq \alpha_{peak} \\ -\alpha_{peak} \leq \frac{v_y + l_f r}{v_x} - \delta \leq \alpha_{peak} \end{cases}$$

[0154] 其中,第一式表示在稳态转向时,轮胎力饱和情况下的极限航向角变化率,即极限横摆角速度  $r_{\max} = \frac{\mu g}{v_x}$ ,对应图5的①、③边界;第二式是对极限后轮侧偏角  $\alpha_{peak}$  的约束,目的为在  $r$  较大时限制  $v_y$ ,避免进入发散区域,对应图5的②、④边界;第三式为对前轮侧偏角的约束,将其限制在轮胎模型的线性区域,确保等效轮胎模型的准确性。

[0155] b) 轮胎极限约束:

[0156] 如果将车辆视为一个质点,根据轮胎摩擦圆,车辆的极限加速度将取决于轮胎与路面的摩擦系数  $\mu$ ,即轮胎摩擦极限约束为:

$$[0157] \quad (a_x)^2 + (a_y)^2 \leq (g\mu)^2$$

[0158] 其中  $a_x, a_y$  分别为车辆质心处的纵向、横向加速度。

[0159] 为便于将模型预测控制问题转化为二次规划问题求解、将其表示为线性约束的形式,在求解控制量  $D^k$  时,将  $\xi^{k-1}$  的车辆状态量  $v_x^{k-1}, v_y^{k-1}, r^{k-1}$  视为常量,将轮胎附着极限约束转化为仅对纵向控制量  $D$  的线性约束,如下:

$$[0160] \quad D_{\min}^{(k)} \leq C_m D^k \leq D_{\max}^{(k)}$$

[0161] 其中:

$$[0162] \quad D_{\max}^{(k)} = D_{\max}(\xi^{(k-1)})$$

$$[0163] \quad = [\text{ma}_f(\xi^{(k-1)}) - F_{\text{lon}}(\xi^{(k-1)})]$$

$$[0164] \quad D_{\min}^{(k)} = D_{\min}(\xi^{(k-1)})$$

$$[0165] \quad = [-\text{ma}_f(\xi^{(k-1)}) - F_{\text{lon}}(\xi^{(k-1)})]$$

$$[0166] \quad a_f = \sqrt{(\mu g)^2 - (v_x r)^2} \quad (22)$$

$$[0167] \quad F_{\text{lon}} = -C_f - C_w (v_x)^2 - F_{f,y} \sin(\delta) + m v_y r$$

[0168] 其中,  $\xi^{(k-1)}$  表示上一时刻解得的预测状态,  $F_{\text{lon}}$  为除纵向控制量外的纵向合力。

[0169] 该约束表示通过牺牲“纵向控制”来配合“横向控制”, 从而保证轮胎力不超过附着极限。

[0170] 而横向控制的稳定性由滑移稳定性约束保证, 由此形成横纵向的行驶稳定性约束, 使用线性不等式约束表示:

$$[0171] \quad H_{sh}^{(k)} \xi(k) \leq G_{sh}^{(k)}$$

[0172] ③状态量约束: 包括对状态量  $\xi^{(k)}$ 、控制增量  $\Delta u^{(k)}$  的约束:

$$[0173] \quad |\xi^{(k)}| \leq \xi_{\max}, \quad |\Delta u^{(k)}| \leq \Delta u_{\max}。$$

[0174] S7: 对目标函数和约束进行预处理, 将问题转化为二次规划问题形式; 求解QP问题, 求解最优控制增量组合  $\Delta u^*$ 。

[0175] ①将目标函数在S3的参考点处线性化, 与S2中线性化方法一致; 并转化为QP问题目标函数的形式, 具体为:

$$[0176] \quad J = \sum_{k=1}^{N_p} \left( \begin{bmatrix} \xi^{(k)} \\ \Delta u^{(k)} \\ s_{sh}^{(k)} \end{bmatrix}^T \tilde{H} \begin{bmatrix} \xi^{(k)} \\ \Delta u^{(k)} \\ s_{sh}^{(k)} \end{bmatrix} - \tilde{f}^T \begin{bmatrix} \xi^{(k)} \\ \Delta u^{(k)} \\ s_{sh}^{(k)} \end{bmatrix} \right)$$

[0177] 式中待优化的变量是控制量增量  $\Delta u = [\Delta D, \Delta \delta, \Delta v_s]^T$ 、控制量所对应的预测状态  $\xi$ 、滑移约束的松弛因子  $s_{sh}$ 。松弛因子的存在是为了通过允许高速车辆出现暂时性滑移现象以保证此优化问题始终存在可行解。对车辆滑移约束施加一定的松弛因子, 可保证当道路的无碰撞轨迹与稳定性约束发生冲突时, 优先保证车辆在可行区域内行驶, 即允许车辆暂时发生滑移。 $\tilde{H}$ ,  $\tilde{f}$  矩阵为S4中三个控制目标在线性化后的一次项与二次项组合。

[0178] ②将S3所得车辆预测模型表示为等式约束, 加上S6所得非等式线性约束, 联立成为QP问题的约束, 具体为:

$$[0179] \quad \xi^{(0)} = \xi_{\text{measure}} \quad (a)$$

$$[0180] \quad \xi^{(k)} = \tilde{A}_d \xi^{(k-1)} + \tilde{B}_d \Delta u^{(k-1)} + \tilde{G}_d \quad (b)$$

$$[0181] \quad H_{env}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{env}^{(k)} \quad (c)$$

$$[0182] \quad H_{sh}^{(k)} \xi^{(k)} \leq G_{sh}^{(k)} \quad (d)$$

$$[0183] \quad \underline{\xi} \leq \xi^{(k)} \leq \overline{\xi} \quad (e)$$

$$[0184] \quad \underline{\Delta u} \leq \Delta u^{(k)} \leq \overline{\Delta u} \quad (f)$$

$$[0185] \quad (k=1, \dots, N_p)$$

[0186] 其中,  $\xi^{(0)}$  为当前车辆状态, (a) 式表示使用S3所得当前车辆状态的测量值  $\xi_{\text{measure}}$  作为首状态点  $\xi^{(0)}$ ; (b) 式为S4中所得预处理后的车辆动力学模型; (c) 式为道路边界约束; (d) 式为行驶稳定性约束; (e), (f) 式为对车辆极限状态和底层执行机构的约束。

[0187] ③求解上述QP问题, 解得目标控制增量  $\Delta u^*$ , 包括预测时域内的多组前轮转角增量  $\Delta \delta$  和纵向控制值增量  $\Delta D$ , 即  $\Delta u^* = [\Delta \delta^*, \Delta D^*]$ ; 将  $\Delta u^*$  的第一组  $\Delta u^*(1) = [\Delta \delta^*(1), \Delta D^*(1)]$  叠加到当前时刻T的车辆控制状态量  $U_T^{(0)} = [\delta_T^{(0)}, D_T^{(0)}]$  上, 得到当前最优控制量  $u^*$  ( $u^* = [\delta^*, D^*]$ ), 包括最优的前轮转角  $\delta^*$  和纵向控制值  $D^*$ 。即:

$$[0188] \quad u^* = [\delta^*, D^*] = [\delta_T^{(0)} + \Delta \delta^*(1), D_T^{(0)} + \Delta D^*(1)]$$

[0189] S8: 输出车辆控制向量  $u^*$ , 将最优的前轮转角  $\delta^*$  和纵向控制值  $D^*$  通过底层控制执行器作用于自动驾驶车辆, 并重复S5~S8, 实现赛车的自主轨迹规划与跟踪的联合控制。

[0190] 本实施例实现了最优行车线规划与控制的联合处理, 降低自动驾驶模块的复杂程度, 减少整体内存占用与处理时间, 有助于提高自动驾驶赛车的操纵稳定性与驾驶表现。

[0191] 本领域普通技术人员可以理解: 以上实施例仅用于说明本发明的技术方案, 而非对其限制; 尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明, 本领域的普通技术人员应当理解: 其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改, 或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换; 而这些修改或者替换, 并不使相应技术方案的本质脱离本发明权利要求限定的范围。

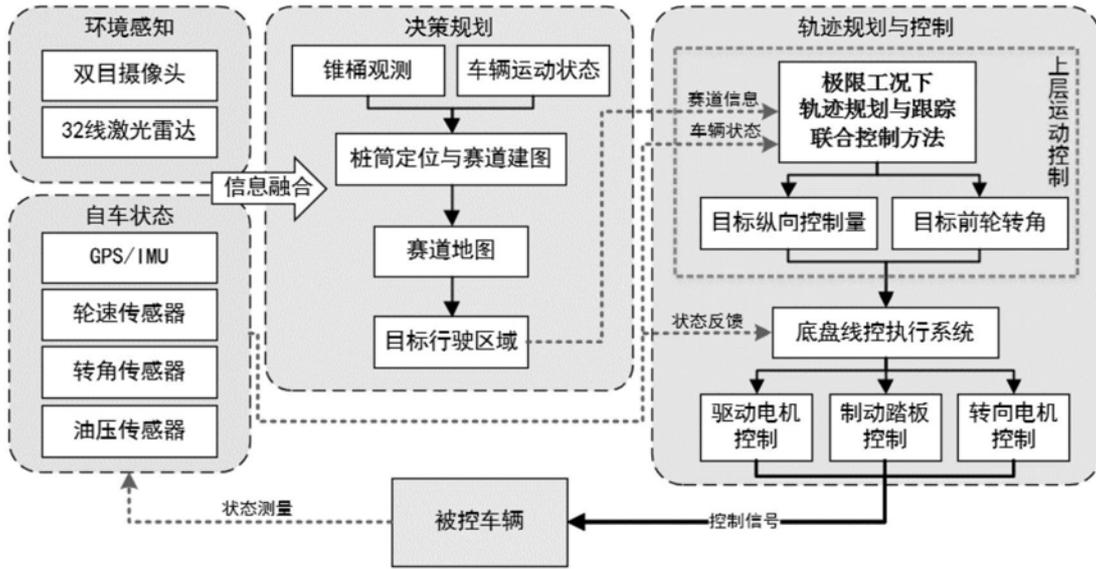


图1

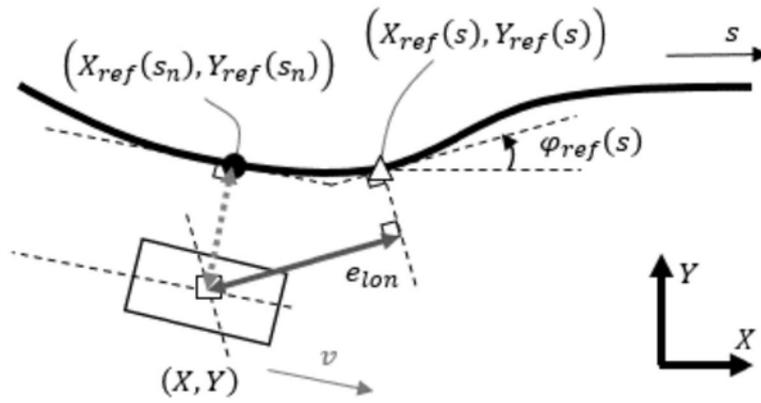


图2

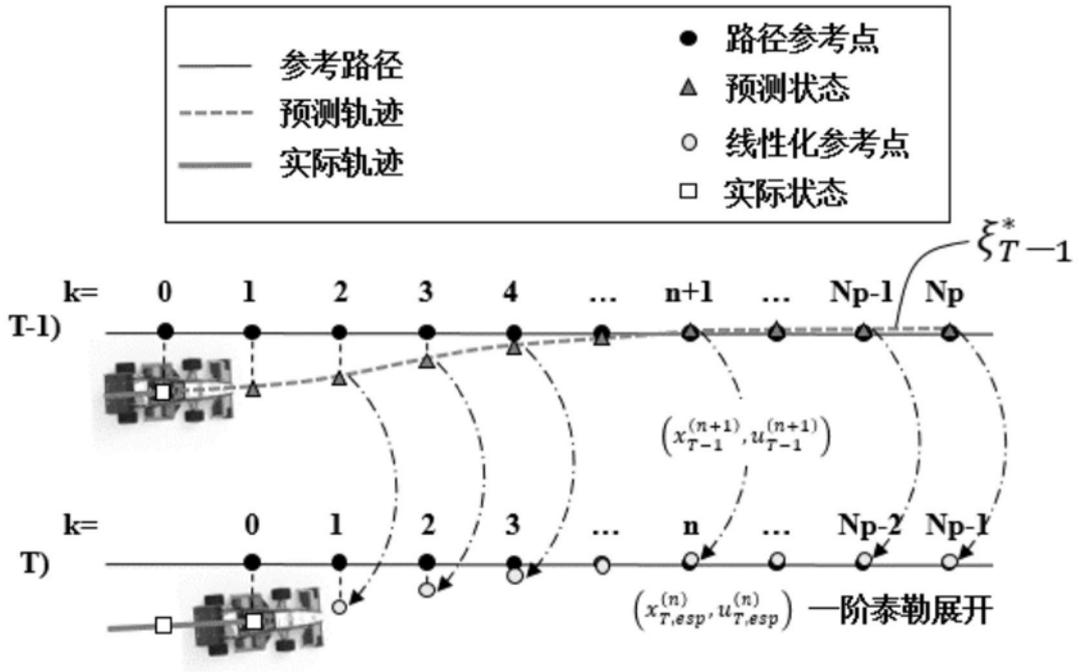


图3

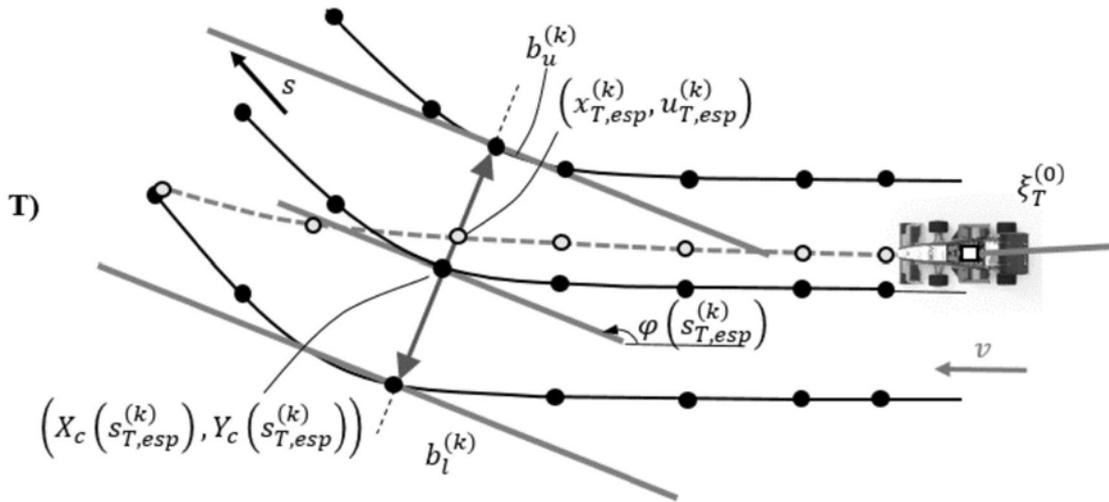


图4

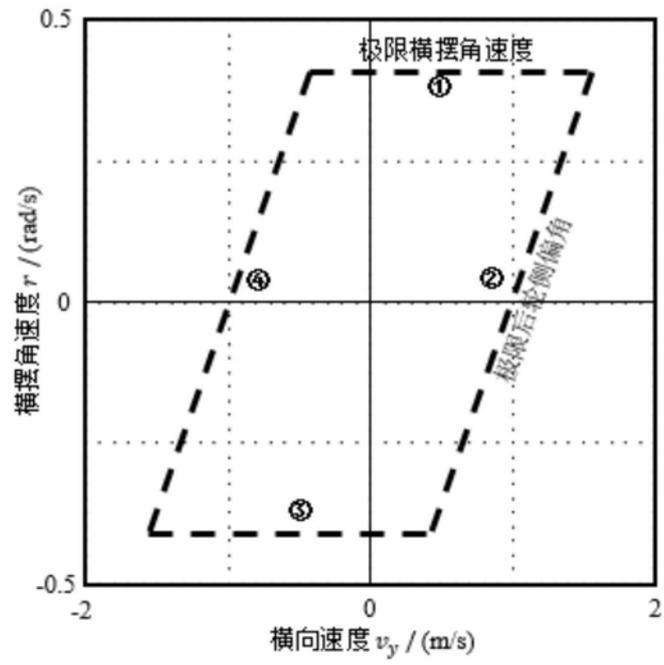


图5

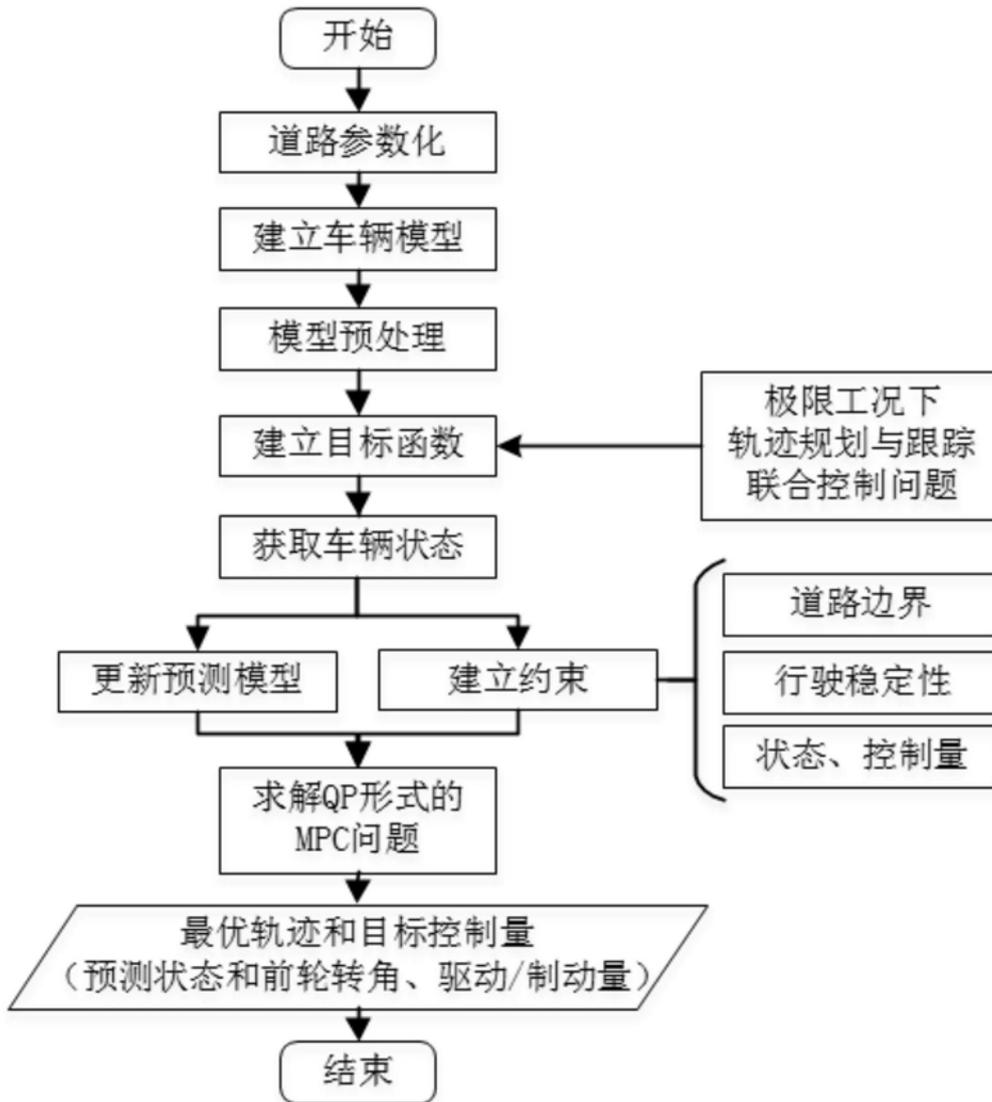


图6