



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113788008 B

(45) 授权公告日 2023. 06. 27

(21) 申请号 202110818448.4

(56) 对比文件

(22) 申请日 2021.07.20

CN 111897344 A, 2020.11.06

DE 102020130387 A1, 2021.05.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113788008 A

审查员 刘亚运

(43) 申请公布日 2021.12.14

(73) 专利权人 浙江万安科技股份有限公司

地址 311835 浙江省绍兴市诸暨市店口镇  
中央路188号

(72) 发明人 陈锋 傅直全 胡斐 俞碧君

(74) 专利代理机构 浙江杭知桥律师事务所

33256

专利代理师 侯帅

(51) Int. Cl.

B60W 30/02 (2012.01)

B60W 40/10 (2012.01)

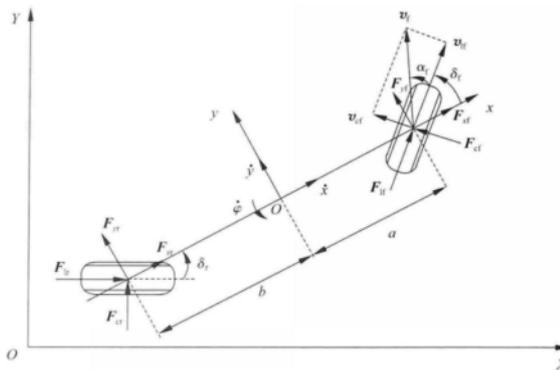
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法,包括以下步骤获取上层决策模块规划的参考轨迹和参考速度;建立车辆动力学非线性模型;对车辆动力学模型进行线性化,然后再对线性车辆模型进行离散化;分别以前轮转角和车辆速度为控制量建立控制目标函数,并设置两个控制量和控制量增量的约束条件;建立两个控制目标函数间的纳什均衡方程,将控制问题转化为纳什优化问题进行求解。本发明考虑集成底盘车辆纵向和横向运动的耦合关系,对车辆前轮转角和车辆速度进行协同控制,通过将纳什均衡理论和MPC控制结合,建立前轮转角和车辆速度的纳什-MPC优化模型,能够提高车辆纵向和横向的跟踪控制效果。



1. 一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤1:获取上层决策模块规划的参考轨迹和参考速度;

步骤2:建立车辆动力学非线性模型;

步骤3:对车辆动力学模型进行线性化,然后再对线性车辆模型进行离散化;

步骤4:分别以前轮转角和车辆速度为控制量建立控制目标函数,并设置两个控制量和控制量增量的约束条件;

步骤5:建立两个控制目标函数间的纳什均衡方程,将控制问题转化为纳什优化问题进行求解;所述步骤2)的车辆动力学模型包括车辆单轨模型和轮胎模型,具体为:

2.1) 车辆单轨模型具体为:

$$m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\phi} + 2F_{xf} + 2F_{xr}$$

$$m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\phi} + 2F_{yf} + 2F_{yr}$$

$$I_z\ddot{\phi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr}$$

式中, $m$ 为车辆质量, $x,y$ 分别为车辆在车辆坐标系下的纵向和横向位置, $\phi$ 为车辆的横摆角, $a,b$ 分别为质心到前后轴的距离, $I_z$ 为车辆绕 $z$ 轴的转动惯量, $F_{xf},F_{xr}$ 为前后轮在 $x$ 方向受到的合力, $F_{yf},F_{yr}$ 为前后轮在 $y$ 方向受到的合力,前后轮在 $x$ 和 $y$ 方向上受到的合力与纵、侧向力的转换关系为:

$$F_{xf} = F_{lf}\cos\delta_f - F_{ef}\sin\delta_f$$

$$F_{xr} = F_{lr}\cos\delta_r - F_{cr}\sin\delta_r$$

$$F_{yf} = F_{lf}\cos\delta_f + F_{cf}\sin\delta_f$$

$$F_{yr} = F_{lr}\cos\delta_r + F_{cr}\sin\delta_r$$

式中, $F_{lf},F_{cf}$ 为前轮的侧向力和纵向力, $F_{lr},F_{cr}$ 为后轮的侧向力和纵向力, $\delta_f$ 为前轮转角;

2.2) 轮胎模型为魔术公式经验模型,具体为:

$$y(x) = D \sin\{C \arctan[Bx - E(Bx - \arctan(Bx))]\}$$

式中, $y(x)$ 代表侧偏力、回正力矩等; $x$ 代表轮胎侧偏角或滑移率; $D$ 代表峰值因子; $C$ 代表曲线形状因子; $B$ 代表刚度因子; $E$ 代表曲线曲率因子;

2.3) 根据小角度假设,即 $\cos\theta \approx 1, \sin\theta \approx \theta, \tan\theta \approx \theta$ ,可以得到前后轮胎的侧向力和纵向力:

$$F_{cf} = C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right)$$

$$F_{cr} = C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}}$$

$$F_{lf} = C_{lf} s_f$$

$$F_{lr} = C_{lr} s_r$$

式中, $C_{cf},C_{cr},C_{lf},C_{lr}$ 分别为前轮侧偏刚度、后轮侧偏刚度、前轮纵向刚度和后轮纵向刚度, $s_f,s_r$ 分别为前、后轮滑移率;通过车辆单轨模型和轮胎模型,得到最终的车辆动力学非线性模型:

$$m\dot{y} = -m\dot{x}\phi + 2 \left[ C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right]$$

$$m\dot{x} = m\dot{y}\phi + 2 \left[ C_{lf} s_f + C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + C_{lr} s_r \right]$$

$$I_z \dot{\phi} = 2 \left[ a C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) - b C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right]$$

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi$$

$$\dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi$$

式中, X, Y 分别为车辆在大地坐标系下的纵向和横向位置; 所述步骤3) 具体包括:

3.1) 线性化车辆动力学模型:

选取状态量  $\xi_{dyn} = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \phi, Y, X]^T$ , 控制量  $u_{dyn} = \delta_f$ , 对非线性动力学模型线性化, 得到线性时变方程:

$$\dot{\xi}_{dyn} = A_{dyn}(t) \xi_{dyn}(t) + B_{dyn}(t) u_{dyn}(t)$$

$$\text{式中, } B_{dyn}(t) = \left[ \frac{2C_{cf}}{m}, \frac{2C_{cf}(2\delta_{f,t-1} - \frac{\dot{y}_t + a\dot{\phi}_t}{\dot{x}_t})}{m}, 0, \frac{2aC_{cf}}{I_z}, 0, 0 \right],$$

$$A_{dyn}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{2(C_{cf} + C_{cr})}{m\dot{x}_t} \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial \dot{x}} & 0 & -\dot{x}_t + \frac{2(bC_{cr} - aC_{cf})}{m\dot{x}_t} & 0 & 0 & 0 \\ \dot{\phi} - \frac{2C_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial \dot{x}} & 0 & \dot{y}_t - \frac{2aC_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2(bC_{cr} - aC_{cf})}{I_z\dot{x}_t} \frac{\partial f_{\phi}}{\partial \dot{x}} & 0 & \frac{-2(a^2C_{cf} + b^2C_{cr})}{I_z\dot{x}_t} & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\varphi_t) & \sin(\varphi_t) & \dot{x}_t \cos(\varphi_t) - \dot{y}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_t) & \cos(\varphi_t) & -\dot{y}_t \cos(\varphi_t) - \dot{x}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\text{其中, } \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial \dot{x}} = \frac{(2C_{cf}(\dot{y}_t + a\dot{\phi}_t) + 2C_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\phi}_t))}{m\dot{x}_t^2} - \dot{\phi}_t, \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial \dot{x}} = \frac{(2C_{cf}\delta_{f,t-1}(\dot{y}_t + a\dot{\phi}_t))}{m\dot{x}_t^2}, \frac{\partial f_{\phi}}{\partial \dot{x}} = \frac{(2aC_{cf}(\dot{y}_t + a\dot{\phi}_t) - 2bC_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\phi}_t))}{I_z\dot{x}_t^2};$$

3.2) 采用一阶差商的方法对线性时变方程进行离散化处理, 得到离散的状态空间表达式:

$$\xi_{dyn}(k+1) = A_{dyn}(k) \xi_{dyn}(k) + B_{dyn}(k) u_{dyn}(k)$$

式中,  $A_{dyn}(k) = I + T A_{dyn}(t)$ ,  $B_{dyn}(k) = T B_{dyn}(t)$ , I 为单位矩阵, T 为采样时间; 所述步骤4) 具体包括:

4.1) 所建立的目标函数要能保证车辆快速且平稳地追踪期望轨迹, 需要加入对系统状态量和控制量地优化, 分别建立前轮转角和车辆速度的控制目标函数, 具体为:

$$J_{u_1}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|u_1(k+i|t) - u_{1,ref}(k+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U_1(k+i|t)\|_R^2 + \rho_1 \varepsilon_1^2$$

$$J_{u_2}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|u_2(k+i|t) - u_{2,ref}(k+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U_2(k+i|t)\|_R^2 + \rho_2 \varepsilon_2^2$$

式中,  $J_{u_1}(k)$ ,  $J_{u_2}(k)$  分别为前轮转角和车辆速度的目标函数,  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  分别为前轮转

角增量和速度增量,  $N_p$  为预测时域,  $N_c$  为控制时域,  $Q, R$  为权重矩阵,  $u_{1,ref}, u_{2,ref}$  分别为参考前轮转角和参考车辆速度,  $\rho_1, \varepsilon_1$  为目标函数  $J_{u_1}(k)$  权重系数和松弛因子,  $\rho_2, \varepsilon_2$  为目标函数  $J_{u_2}(k)$  权重系数和松弛因子;

4.2) 分别建立两个控制量以及控制增量的约束条件:

$$\begin{aligned} u_{1min}(t+k) &\leq u_1(t+k) \leq u_{1max}(t+k) \\ u_{2min}(t+k) &\leq u_2(t+k) \leq u_{2max}(t+k) \\ \Delta U_{1min}(t+k) &\leq \Delta U_1(t+k) \leq \Delta U_{1max}(t+k) \\ \Delta U_{2min}(t+k) &\leq \Delta U_2(t+k) \leq \Delta U_{2max}(t+k) \\ k &= 0, 1, \dots, N_e - 1 \end{aligned}$$

式中,  $\Delta u_{min}, \Delta u_{max}, \Delta U_{min}, \Delta U_{max}$  分别为控制量和控制量增量的最小和最大值。

2. 根据权利要求1所述的一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法, 其特征在于: 所述步骤5) 具体为:

建立两个目标函数的纳什均衡, 将其转化为纳什优化问题:

$$(u_1^*, u_2^*) = \operatorname{argmin} J_{u_1}(u_1, u_2)$$

$$(u_1^*, u_2^*) = \operatorname{argmin} J_{u_2}(u_1, u_2)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } u_{1min}(t+k) &\leq u_1(t+k) \leq u_{1max}(t+k) \\ u_{2min}(t+k) &\leq u_2(t+k) \leq u_{2max}(t+k) \\ \Delta U_{1min}(t+k) &\leq \Delta U_1(t+k) \leq \Delta U_{1max}(t+k) \\ \Delta U_{2min}(t+k) &\leq \Delta U_2(t+k) \leq \Delta U_{2max}(t+k) \end{aligned}$$

通过求解上式所示的问题, 得到最优的前轮转角和车辆速度。

## 一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于集成底盘、轨迹跟踪技术领域，具体为一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法

### 背景技术

[0002] 随着汽车工业的发展，如何控制车辆很好地跟踪给的目标转角和目标车速十分重要。目前车辆的控制主要分为车辆的纵向控制和横向控制。车辆纵向控制的主要控制参数为车辆的速度，车辆的速度由集成底盘的驱动与制动系统决定。车辆横向控制的主要控制参数为车辆的前轮转角，前轮转角由底盘的转向系统决定。现有的控制方法通常将纵向控制和横向控制分开，单独对纵向或者横向进行控制。CN107942679A--基于模糊免疫神经网络算法的全向底盘控制方法，其只是提供一种简单的底板控制方法。然而，车辆的纵向运动和横向运动存在较强的耦合作用，单独对两者进行控制往往无法取得较好的控制效果。在纵向控制方面，自适应巡航控制应用十分广泛，但其只适用于简单的跟车或直线行驶场景，无法适用于换道工况。模型预测控制(MPC)是常用的横向控制方法，但其往往认为车辆速度保持不变，无法达到最佳的控制效果。因此，考虑车辆纵横向耦合，同时对前轮转角和车辆速度进行控制能够提高车辆的整体控制性能。

### 发明内容

[0003] 针对上述现有技术的不足，本发明的目的在于提供一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法，以解决集成底盘车辆纵横向耦合的问题，同时对前轮转角和车辆速度进行优化控制，实现车辆更好的跟踪控制效果。

[0004] 为达到上述目的，本发明采用的技术方案如下：

[0005] 一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法，包括以下步骤：

[0006] 步骤1:获取上层决策模块规划的参考轨迹和参考速度；

[0007] 步骤2:建立车辆动力学非线性模型；

[0008] 步骤3:对车辆动力学模型进行线性化，然后再对线性车辆模型进行离散化；

[0009] 步骤4:分别以前轮转角和车辆速度为控制量建立控制目标函数，并设置两个控制量和控制量增量的约束条件；

[0010] 步骤5:建立两个控制目标函数间的纳什均衡方程，将控制问题转化为纳什优化问题进行求解。

[0011] 作为优选，所述步骤2)的车辆动力学模型包括车辆单轨模型和轮胎模型，具体为：

[0012] 2.1) 车辆单轨模型具体为：

$$[0013] \quad m\ddot{x} = m\dot{\gamma}\phi + 2F_{xf} + 2F_{xr}$$

$$[0014] \quad m\ddot{y} = -m\dot{x}\phi + 2F_{yf} + 2F_{yr}$$

$$[0015] \quad I_z\ddot{\phi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr}$$

[0016] 式中, $m$ 为车辆质量, $x,y$ 分别为车辆在车辆坐标系下的纵向和横向位置, $\varphi$ 为车辆的横摆角, $a,b$ 分别为质心到前后轴的距离, $I_z$ 为车辆绕 $z$ 轴的转动惯量, $F_{xf},F_{xr}$ 为前后轮在 $x$ 方向受到的合力, $F_{yf},F_{yr}$ 为前后轮在 $y$ 方向受到的合力。前后路在 $x$ 和 $y$ 方向上受到的合力与纵、侧向力的转换关系为:

$$[0017] \quad F_{xf} = F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f$$

$$[0018] \quad F_{xr} = F_{lr} \cos \delta_r - F_{cr} \sin \delta_r$$

$$[0019] \quad F_{yf} = F_{lf} \cos \delta_f + F_{cf} \sin \delta_f$$

$$[0020] \quad F_{yr} = F_{lr} \cos \delta_r + F_{cr} \sin \delta_r$$

[0021] 式中, $F_{lf},F_{cf}$ 为前轮的侧向力和纵向力, $F_{lr},F_{cr}$ 为后轮的侧向力和纵向力, $\delta_f$ 为前轮转角;

[0022] 2.2) 轮胎模型为魔术公式经验模型,具体为:

$$[0023] \quad y(x) = D \sin \{ C \arctan [ Bx - E ( Bx - \arctan ( Bx ) ) ] \}$$

[0024] 式中, $y(x)$ 代表侧偏力、回正力矩等; $x$ 代表轮胎侧偏角或滑移率; $D$ 代表峰值因子; $C$ 代表曲线形状因子; $B$ 代表刚度因子; $E$ 代表曲线曲率因子。

[0025] 2.3) 根据小角度假设,即 $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta, \tan \theta \approx \theta$ ,可以得到前后轮胎的侧向力和纵向力:

$$[0026] \quad F_{cf} = C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right)$$

$$[0027] \quad F_{cr} = C_{cr} \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}$$

$$[0028] \quad F_{lf} = C_{lf} s_f$$

$$[0029] \quad F_{lr} = C_{lr} s_r$$

[0030] 式中, $C_{cf},C_{cr},C_{lf},C_{lr}$ 分别为前轮侧偏刚度、后轮侧偏刚度、前轮纵向刚度和后轮纵向刚度, $s_f,s_r$ 分别为前、后轮滑移率。通过车辆单轨模型和轮胎模型,得到最终的车辆动力学非线性模型:

$$[0031] \quad m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2 \left[ C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + C_{cr} \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right]$$

$$[0032] \quad m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2 \left[ C_{lf} s_f + C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + C_{lr} s_r \right]$$

$$[0033] \quad I_z \ddot{\varphi} = 2 \left[ a C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) - b C_{cr} \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right]$$

$$[0034] \quad \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi$$

$$[0035] \quad \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi$$

[0036] 式中, $X,Y$ 分别为车辆在大地坐标系下的纵向和横向位置。

[0037] 作为优选,所述步骤3)具体包括:

[0038] 3.1) 线性化车辆动力学模型:

[0039] 选取状态量 $\xi_{dyn} = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^T$ ,控制量 $u_{dyn} = \delta_f$ ,对非线性动力学模型线性化,得到线性时变方程:

$$[0040] \quad \dot{\xi}_{\text{dyn}} = A_{\text{dyn}}(t)\xi_{\text{dyn}}(t) + B_{\text{dyn}}(t)u_{\text{dyn}}(t)$$

$$[0041] \quad \text{式中, } B_{\text{dyn}}(t) = \left[ \frac{2c_{cf}}{m}, \frac{2c_{cf}(2\delta_{f,t-1} - \frac{\dot{y}_t + a\dot{\psi}_t}{x_t})}{m}, 0, \frac{2ac_{cf}}{I_z}, 0, 0 \right],$$

$$[0042] \quad A_{\text{dyn}}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{2(c_{cf}+c_{cr})}{m\dot{x}_t} \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial \dot{x}} & 0 & -\dot{x}_t + \frac{2(b c_{cr} - a c_{cf})}{m\dot{x}_t} & 0 & 0 \\ \dot{\phi} - \frac{2c_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial \dot{x}} & 0 & \dot{y}_t - \frac{2ac_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2(b c_{cr} - a c_{cf})}{I_z\dot{x}_t} \frac{\partial f_{\dot{\phi}}}{\partial \dot{x}} & 0 & \frac{-2(a^2 c_{cf} + b^2 c_{cr})}{I_z\dot{x}_t} & 0 & 0 \\ \cos(\varphi_t) & \sin(\varphi_t) & \dot{x}_t \cos(\varphi_t) - \dot{y}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_t) & \cos(\varphi_t) & -\dot{y}_t \cos(\varphi_t) - \dot{x}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0043] \quad \text{其中, } \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial \dot{x}} = \frac{(2c_{cf}(\dot{y}_t + a\dot{\psi}_t) + 2c_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\psi}_t))}{m\dot{x}_t^2} - \dot{\phi}_t, \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial \dot{x}} = \frac{(2c_{cf}\delta_{f,t-1}(\dot{y}_t + a\dot{\psi}_t))}{m\dot{x}_t^2}, \frac{\partial f_{\dot{\phi}}}{\partial \dot{x}} = \frac{(2ac_{cf}(\dot{y}_t + a\dot{\psi}_t) - 2bc_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\psi}_t))}{I_z\dot{x}_t^2};$$

[0044] 3.2) 采用一阶差商的方法对线性时变方程进行离散化处理,得到离散的状态空间表达式:

$$[0045] \quad \xi_{\text{dyn}}(t+1) = A_{\text{dyn}}(k)\xi_{\text{dyn}}(k) + B_{\text{dyn}}(k)u_{\text{dyn}}(k)$$

[0046] 式中,  $A_{\text{dyn}}(k) = I + TA_{\text{dyn}}(t)$ ,  $B_{\text{dyn}}(k) = TB_{\text{dyn}}(t)$ ,  $I$  为单位矩阵,  $T$  为采样时间。

[0047] 作为优选,所述步骤4) 具体包括:

[0048] 4.1) 所建立的目标函数要能保证车辆快速且平稳地追踪期望轨迹,需要加入对系统状态量和控制量地优化,分别建立前轮转角和车辆速度的控制目标函数,具体为:

$$[0049] \quad J_{u_1}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|u_1(k+i|t) - u_{1,\text{ref}}(k+i)|t\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U_1(k+i|t)\|_R^2 + \rho_1 \varepsilon_1^2$$

$$[0050] \quad J_{u_2}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|u_2(k+i|t) - u_{2,\text{ref}}(k+i)|t\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U_2(k+i|t)\|_R^2 + \rho_2 \varepsilon_2^2$$

[0051] 式中,  $J_{u_1}(k)$ ,  $J_{u_2}(k)$  分别为前轮转角和车辆速度的目标函数,  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  分别为前轮转角增量和速度增量,  $N_p$  为预测时域,  $N_c$  为控制时域,  $Q, R$  为权重矩阵,  $u_{1,\text{ref}}, u_{2,\text{ref}}$  分别为参考前轮转角和参考车辆速度,  $\rho_1, \varepsilon_1$  为目标函数  $J_{u_1}(k)$  权重系数和松弛因子,  $\rho_2, \varepsilon_2$  为目标函数  $J_{u_2}(k)$  权重系数和松弛因子;

[0052] 4.2) 分别建立两个控制量以及控制增量的约束条件:

$$[0053] \quad u_{1\text{min}}(t+k) \leq u_1(t+k) \leq u_{1\text{max}}(t+k)$$

$$[0054] \quad u_{2\text{min}}(t+k) \leq u_2(t+k) \leq u_{2\text{max}}(t+k)$$

$$[0055] \quad \Delta U_{1\text{min}}(t+k) \leq \Delta U_1(t+k) \leq \Delta U_{1\text{max}}(t+k)$$

$$[0056] \quad \Delta U_{2\text{min}}(t+k) \leq \Delta U_2(t+k) \leq \Delta U_{2\text{max}}(t+k)$$

$$[0057] \quad k=0, 1, \dots, N_c-1$$

[0058] 式中,  $\Delta u_{\text{min}}, \Delta u_{\text{max}}, \Delta U_{\text{min}}, \Delta U_{\text{max}}$  分别为控制量和控制量增量的最小和最大值。

[0059] 作为优选,所述步骤5) 具体为:

[0060] 建立两个目标函数的纳什均衡,将其转化为纳什优化问题:

[0061]  $(u_1^*, u_2^*) = \operatorname{argmin} J_{u_1}(u_1, u_2)$

[0062]  $(u_1^*, u_2^*) = \operatorname{argmin} J_{u_2}(u_1, u_2)$

[0063] s. t.  $u_{1\min}(t+k) \leq u_1(t+k) \leq u_{1\max}(t+k)$

[0064]  $u_{2\min}(t+k) \leq u_2(t+k) \leq u_{2\max}(t+k)$

[0065]  $\Delta U_{1\min}(t+k) \leq \Delta U_1(t+k) \leq \Delta U_{1\max}(t+k)$

[0066]  $\Delta U_{2\min}(t+k) \leq \Delta U_2(t+k) \leq \Delta U_{2\max}(t+k)$

[0067] 通过求解上式所示的问题,得到最优的前轮转角和车辆速度。

[0068] 本发明的有益效果:

[0069] 本发明考虑集成底盘车辆纵向和横向运动的耦合关系,对车辆前轮转角和车辆速度进行协同控制,通过将纳什均衡理论和MPC控制结合,建立前轮转角和车辆速度的纳什-MPC优化模型,能够提高车辆纵向和横向的跟踪控制效果。

## 附图说明

[0070] 图1为车辆动力学非线性模型。

[0071] 图2为本发明纳什-MPC控制方法流程。

## 具体实施方式

[0072] 下面结合附图与实施例对本发明作进一步详细描述。

[0073] 实施例1

[0074] 一种基于纳什-MPC的集成底盘轨迹跟踪控制方法,包括以下步骤:

[0075] 步骤1:获取上层决策模块规划的参考轨迹和参考速度;

[0076] 步骤2:建立车辆动力学非线性模型;

[0077] 步骤3:对车辆动力学模型进行线性化,然后再对线性车辆模型进行离散化;

[0078] 步骤4:分别以前轮转角和车辆速度为控制量建立控制目标函数,并设置两个控制量和控制量增量的约束条件;

[0079] 步骤5:建立两个控制目标函数间的纳什均衡方程,将控制问题转化为纳什优化问题进行求解。

[0080] 本实施例中,所述步骤2)的车辆动力学模型包括车辆单轨模型和轮胎模型,具体为:

[0081] 2.1) 车辆单轨模型具体为:

[0082]  $m\ddot{x} = m\dot{\phi} + 2F_{xf} + 2F_{xr}$

[0083]  $m\ddot{y} = -m\dot{x}\phi + 2F_{yf} + 2F_{yr}$

[0084]  $I_z\ddot{\phi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr}$

[0085] 式中, $m$ 为车辆质量, $x, y$ 分别为车辆在车辆坐标系下的纵向和横向位置, $\phi$ 为车辆的横摆角, $a, b$ 分别为质心到前后轴的距离, $I_z$ 为车辆绕 $z$ 轴的转动惯量, $F_{xf}, F_{xr}$ 为前后轮在 $x$ 方向受到的合力, $F_{yf}, F_{yr}$ 为前后轮在 $y$ 方向受到的合力。前后路在 $x$ 和 $y$ 方向上受到的合力与纵、侧向力的转换关系为:

$$[0086] \quad F_{xf} = F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f$$

$$[0087] \quad F_{xr} = F_{lr} \cos \delta_r - F_{cr} \sin \delta_r$$

$$[0088] \quad F_{yf} = F_{lf} \cos \delta_f + F_{cf} \sin \delta_f$$

$$[0089] \quad F_{yr} = F_{lr} \cos \delta_r + F_{cr} \sin \delta_r$$

[0090] 式中,  $F_{lf}, F_{cf}$  为前轮的侧向力和纵向力,  $F_{lr}, F_{cr}$  为后轮的侧向力和纵向力,  $\delta_f$  为前轮转角;

[0091] 2.2) 轮胎模型为魔术公式经验模型, 具体为:

$$[0092] \quad y(x) = D \sin \{C \arctan [Bx - E(Bx - \arctan(Bx))]\}$$

[0093] 式中,  $y(x)$  代表侧偏力、回正力矩等;  $x$  代表轮胎侧偏角或滑移率;  $D$  代表峰值因子;  $C$  代表曲线形状因子;  $B$  代表刚度因子;  $E$  代表曲线曲率因子。

[0094] 2.3) 根据小角度假设, 即  $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta, \tan \theta \approx \theta$ , 可以得到前后轮胎的侧向力和纵向力:

$$[0095] \quad F_{cf} = C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right)$$

$$[0096] \quad F_{cr} = C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}}$$

$$[0097] \quad F_{lf} = C_{lf} s_f$$

$$[0098] \quad F_{lr} = C_{lr} s_r$$

[0099] 式中,  $C_{cf}, C_{cr}, C_{lf}, C_{lr}$  分别为前轮侧偏刚度、后轮侧偏刚度、前轮纵向刚度和后轮纵向刚度,  $s_f, s_r$  分别为前、后轮滑移率。通过车辆单轨模型和轮胎模型, 得到最终的车辆动力学非线性模型:

$$[0100] \quad m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\phi} + 2 \left[ C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right]$$

$$[0101] \quad m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\phi} + 2 \left[ C_{lf} s_f + C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + C_{lr} s_r \right]$$

$$[0102] \quad I_z \ddot{\phi} = 2 \left[ a C_{cf} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} \right) - b C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right]$$

$$[0103] \quad \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi$$

$$[0104] \quad \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi$$

[0105] 式中,  $X, Y$  分别为车辆在大地坐标系下的纵向和横向位置。

[0106] 作为优选, 所述步骤3) 具体包括:

[0107] 3.1) 线性化车辆动力学模型:

[0108] 选取状态量  $\xi_{dyn} = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\phi}, Y, X]^T$ , 控制量  $u_{dyn} = \delta_f$ , 对非线性动力学模型线性化, 得到线性时变方程:

$$[0109] \quad \dot{\xi}_{dyn} = A_{dyn}(t) \xi_{dyn}(t) + B_{dyn}(t) u_{dyn}(t)$$

$$[0110] \quad \text{式中, } B_{dyn}(t) = \left[ \frac{2C_{cf}}{m}, \frac{2C_{cf}(2\delta_{f,t-1} - \frac{\dot{y}_t + a\dot{\phi}_t}{\dot{x}_t})}{m}, 0, \frac{2aC_{cf}}{I_z}, 0, 0 \right],$$

$$[0111] \quad A_{\text{dyn}}(t) = \begin{bmatrix} \frac{2(c_{cf}+c_{cr})}{m\dot{x}_t} \frac{\partial f_y}{\partial \dot{x}} & 0 & -\dot{x}_t + \frac{2(b c_{cr} - a c_{cf})}{m\dot{x}_t} & 0 & 0 \\ \dot{\varphi} - \frac{2c_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} \frac{\partial f_x}{\partial \dot{x}} & 0 & \dot{y}_t - \frac{2a c_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{2(b c_{cr} - a c_{cf})}{I_z \dot{x}_t} \frac{\partial f_\varphi}{\partial \dot{x}} & 0 & \frac{-2(a^2 c_{cf} + b^2 c_{cr})}{I_z \dot{x}_t} & 0 & 0 \\ \cos(\varphi_t) & \sin(\varphi_t) & \dot{x}_t \cos(\varphi_t) - \dot{y}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_t) & \cos(\varphi_t) & -\dot{y}_t \cos(\varphi_t) - \dot{x}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0112] \quad \text{其中, } \frac{\partial f_y}{\partial \dot{x}} = \frac{(2c_{cf}(\dot{y}_t + a\dot{\varphi}_t) + 2c_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\varphi}_t))}{m\dot{x}_t^2} - \dot{\varphi}_t, \quad \frac{\partial f_x}{\partial \dot{x}} = \frac{(2c_{cf}\delta_{f,t-1}(\dot{y}_t + a\dot{\varphi}_t))}{m\dot{x}_t^2}, \quad \frac{\partial f_\varphi}{\partial \dot{x}} = \frac{(2a c_{cf}(\dot{y}_t + a\dot{\varphi}_t) - 2b c_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\varphi}_t))}{I_z \dot{x}_t^2};$$

[0113] 3.2) 采用一阶差商的方法对线性时变方程进行离散化处理, 得到离散的状态空间表达式:

$$[0114] \quad \xi_{\text{dyn}}(k+1) = A_{\text{dyn}}(k) \xi_{\text{dyn}}(k) + B_{\text{dyn}}(k) u_{\text{dyn}}(k)$$

[0115] 式中,  $A_{\text{dyn}}(k) = I + T A_{\text{dyn}}(t)$ ,  $B_{\text{dyn}}(k) = T B_{\text{dyn}}(t)$ ,  $I$  为单位矩阵,  $T$  为采样时间。

[0116] 作为优选, 所述步骤4) 具体包括:

[0117] 4.1) 所建立的目标函数要能保证车辆快速且平稳地追踪期望轨迹, 需要加入对系统状态量和控制量地优化, 分别建立前轮转角和车辆速度的控制目标函数, 具体为:

$$[0118] \quad J_{u_1}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|u_1(k+i|t) - u_{1,\text{ref}}(k+i)|t\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U_1(k+i|t)\|_R^2 + \rho_1 \varepsilon_1^2$$

$$[0119] \quad J_{u_2}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|u_2(k+i|t) - u_{2,\text{ref}}(k+i)|t\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U_2(k+i|t)\|_R^2 + \rho_2 \varepsilon_2^2$$

[0120] 式中,  $J_{u_1}(k)$ ,  $J_{u_2}(k)$  分别为前轮转角和车辆速度的目标函数,  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  分别为前轮转角增量和速度增量,  $N_p$  为预测时域,  $N_c$  为控制时域,  $Q, R$  为权重矩阵,  $u_{1,\text{ref}}, u_{2,\text{ref}}$  分别为参考前轮转角和参考车辆速度,  $\rho_1, \varepsilon_1$  为目标函数  $J_{u_1}(k)$  权重系数和松弛因子,  $\rho_2, \varepsilon_2$  为目标函数  $J_{u_2}(k)$  权重系数和松弛因子;

[0121] 4.2) 分别建立两个控制量以及控制增量的约束条件:

$$[0122] \quad u_{1\min}(t+k) \leq u_1(t+k) \leq u_{1\max}(t+k)$$

$$[0123] \quad u_{2\min}(t+k) \leq u_2(t+k) \leq u_{2\max}(t+k)$$

$$[0124] \quad \Delta U_{1\min}(t+k) \leq \Delta U_1(t+k) \leq \Delta U_{1\max}(t+k)$$

$$[0125] \quad \Delta U_{2\min}(t+k) \leq \Delta U_2(t+k) \leq \Delta U_{2\max}(t+k)$$

$$[0126] \quad k=0, 1, \dots, N_c-1$$

[0127] 式中,  $\Delta u_{\min}, \Delta u_{\max}, \Delta U_{\min}, \Delta U_{\max}$  分别为控制量和控制量增量的最小和最大值。

[0128] 作为优选, 所述步骤5) 具体为:

[0129] 建立两个目标函数的纳什均衡, 将其转化为纳什优化问题:

$$[0130] \quad (u_1^*, u_2^*) = \operatorname{argmin} J_{u_1}(u_1, u_2)$$

$$[0131] \quad (u_1^*, u_2^*) = \operatorname{argmin} J_{u_2}(u_1, u_2)$$

$$[0132] \quad \text{s. t. } u_{1\min}(t+k) \leq u_1(t+k) \leq u_{1\max}(t+k)$$

[0133]  $u_{2\min}(t+k) \leq u_1(t+k) \leq u_{2\max}(t+k)$

[0134]  $\Delta U_{1\min}(t+k) \leq \Delta U_1(t+k) \leq \Delta U_{1\max}(t+k)$

[0135]  $\Delta U_{2\min}(t+k) \leq \Delta U_2(t+k) \leq \Delta U_{2\max}(t+k)$

[0136] 通过求解上式所示的问题,得到最优的前轮转角和车辆速度。从而为车辆提供可靠的参数数据,保证车辆控制更加精准。

[0137] 本发明考虑集成底盘车辆纵向和横向运动的耦合关系,对车辆前轮转角和车辆速度进行协同控制,通过将纳什均衡理论和MPC控制结合,建立前轮转角和车辆速度的纳什-MPC优化模型,能够提高车辆纵向和横向的跟踪控制效果。

[0138] 本发明具体应用途径很多,以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以作出若干改进,这些改进也应视为本发明的保护范围。

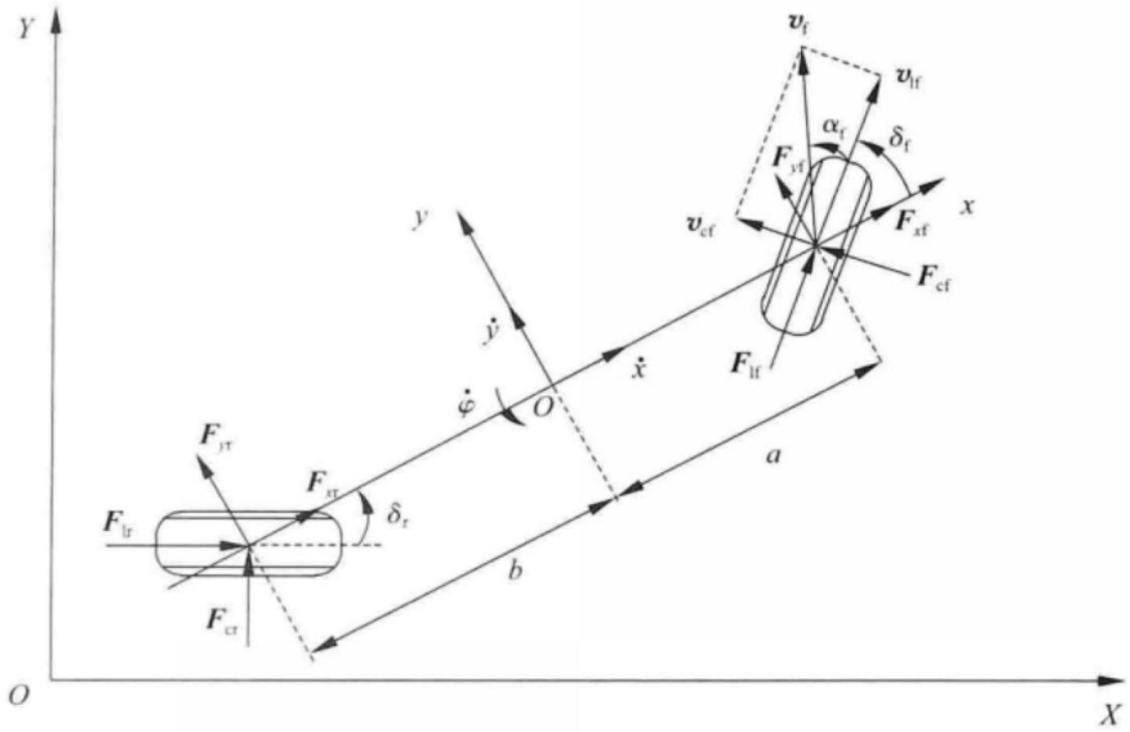


图1

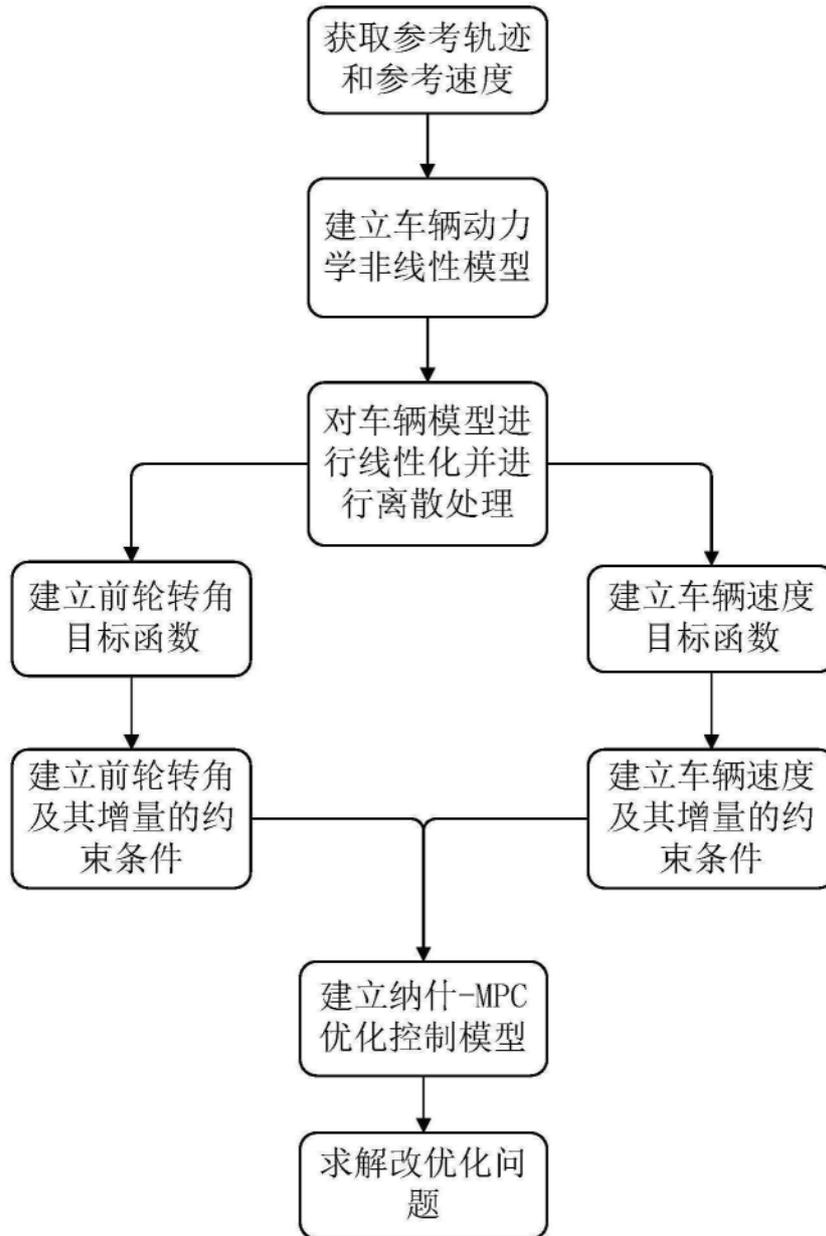


图2