



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114859733 B

(45) 授权公告日 2023.03.14

(21) 申请号 202210561298.8

CN 108454623 A, 2018.08.28

(22) 申请日 2022.05.23

CN 111717278 A, 2020.09.29

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 113619564 A, 2021.11.09

申请公布号 CN 114859733 A

CN 108248605 A, 2018.07.06

CN 113306545 A, 2021.08.27

(43) 申请公布日 2022.08.05

Xiaodong Wu等.Differential speed steering control for four-wheel independent driving electric vehicle.《2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics》.2013,

(73) 专利权人 南京林业大学

地址 210034 江苏省南京市龙蟠路159号

Jie Tian等.Differential Steering Control of Four-Wheel Independent-Drive Electric Vehicles.《Energies》.2018,

(72) 发明人 田杰 周建兵 杨铭菲

(74) 专利代理机构 北京东方盛凡知识产权代理有限公司 11562

专利代理师 刘芳

孙银健.基于模型预测控制的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制算法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技II辑》.2015,

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

审查员 徐莹

(56) 对比文件

CN 111717278 A, 2020.09.29

CN 111806427 A, 2020.10.23

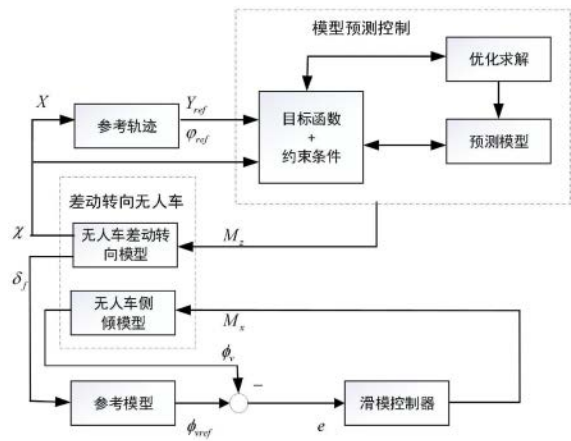
权利要求书6页 说明书13页 附图5页

(54) 发明名称

一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法

(57) 摘要

本发明提供了一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法,本方法通过差动转向实现无人车轨迹跟踪的同时,也提出了对车身姿态的控制以提高差动转向无人车的操纵稳定性。首先建立了无人车差动转向的动力学和运动学模型以及无人车侧倾模型,选取线性三自由度车辆模型作为参考模型以得到理想的车身侧倾角。给出了参考轨迹,通过模型预测控制器控制无人车差动转向模型跟踪给定的参考轨迹,以得到所需的差动力矩以及由此产生的前轮转角,设计了滑模控制器控制无人车侧倾模型跟踪理想车身侧倾角,并得到所需的侧倾力矩,仿真结果表明,模型预测控制和滑模控制器能使得差动转向无人车实现轨迹跟踪的同时也能实现车身姿态的控制。



1. 一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1建立三个车辆模型包括无人车差动转向模型、无人车侧倾模型和参考模型;

S11所述无人车差动转向模型包括纵向、侧向、横摆的动力学模型及运动学模型,用于通过模型预测控制跟踪特定轨迹,并获取所需的差动力矩以及由此产生的前轮转角;

S12所述无人车侧倾模型用于通过滑模控制跟踪理想车身侧倾角;

S13所述参考模型则主要为差动转向无人车的姿态控制提供理想的车身侧倾角;

S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹;

S3通过模型预测控制器实现差动转向,并通过控制无人车跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩 $M_z$ ;

S4通过滑模控制器,即车身内倾控制器,控制无人车侧倾模型跟踪理想车身侧倾角,并通过指数趋近律的控制降低系统的抖动;

S5对车辆模型进行仿真,并对仿真的结果进行分析;

步骤S1无人车差动转向模型, $XOY$ 为惯性坐标系, $xoy$ 为固定在车辆质心的车体坐标系,根据牛顿第二定律,分别得沿 $x$ 轴、 $y$ 轴和绕 $z$ 轴的受力平衡方程式为:

$$\begin{cases} ma_y = m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\phi}) = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \\ m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\phi}) = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} - (F_{yfl} + F_{yfr})\delta_f \\ I_z\ddot{\phi} = l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{l_s}{r}M_z \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{yfl} = F_{yfr} = k_f\alpha_f, F_{yrl} = F_{yrr} = k_r\alpha_r, F_{xfl} = F_{xfr} = k_{lf}s_f, F_{xrl} = F_{xrr} = k_{lr}s_r,$$

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}, \quad \alpha_r = \frac{-\dot{y} + l_r\dot{\phi}}{\dot{x}},$$

其中, $m$ 为车辆总质量, $a_y$ 为 $y$ 轴方向车辆质心处的惯性加速度, $\dot{y}$ 和 $\ddot{y}$ 为沿 $y$ 轴的侧向速度和加速度, $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 为沿 $x$ 轴的纵向速度和加速度, $\dot{\phi}$ 和 $\ddot{\phi}$ 为车辆的横摆角速度和角加速度, $F_{yfl}$ 、 $F_{yfr}$ 、 $F_{yrl}$ 和 $F_{yrr}$ 分别为前后左右四个车轮的侧向力, $F_{xfl}$ 、 $F_{xfr}$ 、 $F_{xrl}$ 和 $F_{xrr}$ 分别为前后左右四个车轮的纵向力, $I_z$ 为车辆的横摆转动惯量, $l_f$ 和 $l_r$ 分别为质心到前后轴的距离, $l_s$ 为轮距的一半, $k_f$ 和 $k_r$ 分别为前后轮侧偏刚度, $\alpha_f$ 和 $\alpha_r$ 分别为前后轮侧偏角, $k_{lf}$ 和 $k_{lr}$ 分别为前后轮纵向刚度, $s_f$ 和 $s_r$ 分别为前后轮滑移率;

由建立的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{Y} = \dot{x}\sin\varphi + \dot{y}\cos\varphi \\ \dot{X} = \dot{x}\cos\varphi - \dot{y}\sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

分布式直驱无人车的四个车轮内均安装轮毂电机,两前轮毂电机可实现差动转向,所谓差动转向是指通过同轴左右两轮的驱动力矩差来实现转向,当驾驶员的意图通过方向盘提供给电控单元后,电控单元就会分别给左右前轮的轮毂电机一个指令以产生大小不同的两个驱动力 $F_{xfl}$ 和 $F_{xfr}$ ,由于主销偏移距 $r_o$ 的存在,此二驱动力分别绕各自的主销产生使得车轮向车辆纵向中心线偏转的力矩 $\tau_{dr}$ 和 $\tau_{dl}$ ,当此二力矩相同时,汽车直行;当 $\tau_{dr} \neq \tau_{dl}$ 时,两车轮在转向梯形机构的作用下就会向力矩小的一侧偏转,从而实现差动转向;

差动转向系统的动力学方程表示为

$$J_e \ddot{\delta}_f + b_e \dot{\delta}_f = \tau_\alpha + \frac{M_z}{r} r_\sigma - \tau_f \quad (3)$$

$$\tau_a = \tau_{ar} + \tau_{al} = 2k_f \alpha_f l^2 / 3, M_z = T_{fl} - T_{fr} = (F_{xf1} - F_{xf2}) r,$$

其中,  $J_e$  和  $b_e$  分别为转向系统的等效转动惯量和阻尼系数,  $\tau_{al}$  和  $\tau_{ar}$  分别为左右前轮的回正力矩,  $\tau_a$  为前轮的总回正力矩,  $T_{fl}$  和  $T_{fr}$  分别为左右前轮的驱动力矩,  $F_{xf1}$  和  $F_{xf2}$  分别为左右前轮的纵向力,  $M_z$  为左右前轮的差动力矩,  $r$  为轮胎滚动半径,  $\tau_f$  为转向系统的摩擦力,  $l$  为前轮轮胎接地印迹的一半;

综合 (1) ~ (3) 得到的无人车差动转向数学模型为

$$\begin{cases} \delta_f = \frac{2l_s^2 k_f}{3b_e} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + \frac{r_\sigma}{b_e r} M_z \\ \ddot{y} = -\dot{x} \dot{\varphi} + \frac{2}{m} \left[ k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + k_r \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right] \\ \ddot{x} = \dot{y} \dot{\varphi} + \frac{2}{m} \left[ k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + k_{lf} S_f + k_{lr} S_r \right] \\ \ddot{\varphi} = \frac{1}{I_z} \left[ 2l_f k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) - 2l_r k_r \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\varphi}}{\dot{x}} + \frac{l_s}{r} M_z \right] \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

取状态变量为  $\chi(t) = [\delta_f \quad \dot{y} \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\varphi} \quad Y \quad X]^T$ ,  $u(t) = M_z$  时, 则方程 (4) 可表示为

$$\dot{\chi}(t) = f(\chi(t), u(t)) \quad (5);$$

步骤S1无人车侧倾模型, 考虑到车辆曲线行驶时, 位于悬架上的车身向外倾斜会导致内侧车轮垂直载荷的急剧减小, 当发生在前轮时极有能直接导致差动转向的失效, 严重时甚至会引发车辆的侧翻, 通过主动悬架将车身主动内倾至最佳角度使得重力分力与离心力平衡, 则能有效保证车辆差动转向的有效性以及转向时的稳定性, 建立的无人车侧倾动力学方程为:

$$I_x \ddot{\phi}_v = m_s a_y h + m_s g h \phi_v - c_v \dot{\phi}_v - k_v \phi_v + M_x \quad (6)$$

其中,  $I_x$  为车辆的侧倾转动惯量,  $\phi_v$ 、 $\dot{\phi}_v$  和  $\ddot{\phi}_v$  分别为侧倾角、角速度和角加速度,  $h$  为质心位置处侧倾中心高度到车轴的侧倾中心高度的距离,  $m_s$  为车辆簧上质量,  $g$  为重力加速度,  $c_v$  和  $k_v$  为悬架的侧倾阻尼系数和侧倾刚度系数,  $M_x$  为主动悬架提供的侧倾力矩;

将 (1) 中的第一个方程带入, 得

$$\ddot{\phi}_v = \frac{1}{I_x} \left[ \frac{2m_s k_f h}{m} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + \frac{2m_s k_r h}{m} \left( \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + m_s g h \phi_v - c_v \dot{\phi}_v - k_v \phi_v + M_x \right].$$

2. 根据权利要求1所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法, 其特征在于, 步骤S1模型预测控制器用于控制无人车差动转向模型跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩  $M_z$ , 因此通过如下方法得到 (5) 的线性方程,

$$\begin{cases} \dot{\chi}(t) = A(t)\chi(t) + B(t)u(t), \\ y(t) = C(t)\chi(t) \end{cases}, \quad (7)$$

$$A(t) = \frac{\partial f}{\partial \chi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\delta}} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\varphi}} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\phi}} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\phi}} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial X} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_7}{\partial \delta} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\delta}} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial f_7}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\varphi}} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\phi}} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\phi}} & \frac{\partial f_7}{\partial Y} & \frac{\partial f_7}{\partial X} \end{bmatrix}, \quad B(t) = \frac{\partial f}{\partial u} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial M_z} & \frac{\partial f_1}{\partial M_x} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_7}{\partial M_z} & \frac{\partial f_7}{\partial M_x} \end{bmatrix}, \quad C(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

对(7)采用一阶差商的方法进行离散化处理得到如下离散的状态空间表达式

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k), \quad (8)$$

其中,  $A(k) = I + TA(t)$ ,  $B(k) = TB(t)$ ,

构建新的状态变量  $\xi(k) = [x(k) \ u(k)]^T$ , 则(8)可以表示为

$$\begin{cases} \xi(k+1|t) = \tilde{A}(k)\xi(k|t) + \tilde{B}(k)\Delta u(k|t), \\ \eta(k|t) = \tilde{C}(k)\xi(k|t) \end{cases},$$

$$\tilde{A}(k) = \begin{bmatrix} A(k) & B(k) \\ 0_{1 \times 7} & I_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}(k) = \begin{bmatrix} B(k) \\ I_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

则系统的预测输出方程可表示为

$$Y(k+1|t) = \psi \xi(k|t) + \Theta \Delta u(k|t) \quad (9)$$

$$Y(k+1|t) = \begin{bmatrix} \eta(k+1|t) \\ \eta(k+2|t) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p|t) \end{bmatrix}, \quad \Delta U(k|t) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|t) \\ \Delta u(k+1|t) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c|t) \end{bmatrix},$$

$$\psi = \begin{bmatrix} C\tilde{A}_{k,1} \\ C\tilde{A}_{k,2} \\ \vdots \\ C\tilde{A}_{k,N_c} \\ \vdots \\ C\tilde{A}_{k,N_p} \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} C\tilde{B}_k & 0 & \cdots & 0 \\ C\tilde{A}_k\tilde{B}_k & C\tilde{B}_k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C\tilde{A}_{k,N_c}\tilde{B}_k & C\tilde{A}_{k,N_c-1}\tilde{B}_k & \cdots & C\tilde{B}_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C\tilde{A}_{k,N_p-1}\tilde{B}_k & C\tilde{A}_{k,N_p-2}\tilde{B}_k & \cdots & C\tilde{A}_{k,N_p-N_c-1}\tilde{B}_k \end{bmatrix},$$

其中,  $N_p$ 为预测时域,  $N_c$ 为控制时域。

3. 根据权利要求1所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法, 其特征在于, 还包括滑模控制器模块, 所述滑模控制器模块中滑模控制是一种鲁棒性很强的控制方法, 有着快速响应、对外界变化扰动不敏感优点, 通过指数趋近律的控制降低系统的抖动, 基于滑模控制理论设计车身内倾控制器, 依据建立的无人车侧倾模型和参考模型, 设车身外倾角与理想车身外倾角的跟踪误差为  $e$ ,

$$e = \phi_{vref} - \phi_v \quad (10)$$

对车身外倾角的控制选取如下的切换函数:

$$s = ce + \dot{e} \quad (11)$$

式中,  $c$  为需满足Hurwitz条件的控制器参数, 其值大于零,

取  $\dot{s} = 0$ , 即

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{\phi}_{vref} - \ddot{\phi}_v = 0 \quad (12)$$

将(6)中的无人车侧倾动力学方程式代入(12), 得车身侧倾的等效控制为:

$$M_{xeq} = -\frac{2k_fm_s h}{m}\delta + \frac{2(k_f+k_r)m_s h}{m}\beta - \frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)m_s h}{mv_x}\gamma - (m_s g h - k_v)\phi_v - c_v \dot{\phi}_v + I_x(c\dot{e} + \ddot{\phi}_{vd}) \quad (13)$$

为保证滑模到达条件成立, 即  $s\dot{s} \leq -\eta|s|$ , ( $\eta > 0$ ), 设计车身侧倾的切换控制为:

$$M_{xsw} = I_x(k+\eta) \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

其中,  $k$  为控制器参数, 其值大于零,

则车身侧倾的滑模控制律由等效控制项和切换控制项组成, 即

$$M_x = M_{xqe} + M_{xsw}$$

4. 根据权利要求3所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法, 其特征在于, 将目标函数转化为如下的标准二次型

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = [\Delta U(t)^T, \varepsilon]^T H [\Delta U(t)^T, \varepsilon] + G [\Delta U(t)^T, \varepsilon]$$

$$\text{其中, } H = \begin{bmatrix} \Theta^T Q \Theta + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix}, G = [2e_1^T Q \Theta \quad 0], e_1 \text{ 为预测时域内的跟踪误差,}$$

约束条件设计为

$$\begin{cases} \Delta U_{min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{max} \\ U_{min} \leq A\Delta U \leq U_{max} \\ y_{h,min} \leq y_h \leq y_{h,max} \\ y_{s,min} - \varepsilon \leq y_s \leq y_{s,max} + \varepsilon \end{cases}$$

目标函数和约束条件, 通过matlab的quadprog函数即完成二次规划问题的求解, 得到差动转向无人车跟踪参考轨迹所需的差动力矩  $M_z$ 。

5. 根据权利要求1所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法, 其特征在于, 所述模型预测控制器控制无人车差动转向模型跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩  $M_z$ , 期望无人车快速平稳地追踪上期望轨迹

设置目标函数为:

$$J(k) = Q \sum_{i=1}^{N_p} \|\Delta \eta(k+i|t)\|^2 + R \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(k+i|t)\|^2 + \rho \varepsilon^2$$

其中,  $\Delta \eta(k+i|t)$  为实际系统和参考系统状态之间的跟踪误差,  $\Delta U(k+i|t)$  为差动力矩的控制增量,  $Q$ 、 $R$  和  $\rho$  均为权重系数,  $\varepsilon$  为松弛因子。

6. 根据权利要求1所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法, 其特征在于, 步骤S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹中从无人车差动转向模型中引出横向位置  $X$

以获得模型预测控制目标函数所需的参考轨迹 $Y_{ref}$ 和 $\varphi_{ref}$ ,并同时提供相关的状态变量 $x$ 给约束条件,即可通过优化求解得到差动转向无人车跟踪特定行驶轨迹所需的差动力矩 $M_z$ ,此外,再通过滑模控制器使得如(7)所示的无人车侧倾车辆模型具有和参考模型完全相同的车身内倾角,并由此获得控制车辆所需的侧倾力矩 $M_x$ ,将获得的差动力矩 $M_z$ 和侧倾力矩 $M_x$ 分别输入给无人车差动转向模型和无人车侧倾车辆模型,即可得到状态变量 $x$ ,前轮转角 $\delta_f$ 以及车身内倾角 $\phi_v$ ,其中,前轮转角用于提供给参考模型以得到理想的车身内倾角 $\phi_{vref}$ ,车身内倾角 $\phi_v$ 则与理想车身内倾角 $\phi_{vref}$ 用于产生滑模控制所需的跟踪误差 $e$ ,如此便可构成闭环控制系统。

7. 根据权利要求1所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法,其特征在于,步骤S13所述参考模型是为后续控制策略研究中提供所需的理想车身侧倾角,要求模型不能太复杂,故采用线性三自由度车辆模型作为参考模型,即忽略转向系统影响和悬架作用,仅考虑车辆的侧向、横摆和侧倾运动,同时对轮胎线性化处理:

设状态空间变量为 $x_d(t) = [\beta_d \quad \gamma_d \quad \phi_v \quad \dot{\phi}_v]^T$ ,系统输入为前轮转角 $\delta_f$ ,即 $u_2(t) = \delta_f$ ,则参考模型表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_2 \\ y_d = C_d x_d + D_d u_2 \end{cases}, \quad (15)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} -\frac{2(k_f+k_r)}{mv_x} & -1 + \frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)}{mv_x^2} & 0 & 0 \\ \frac{(-2k_f l_f + 2k_r l_r)}{I_z} & -\frac{2k_f l_f^2 + 2k_r l_r^2}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2(k_f+k_r)m_s h}{I_x m} & -\frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)m_s h}{I_x m v_x} & \frac{m_s g h - k_v}{I_x} & -\frac{c_v}{I_x} \end{bmatrix},$$

$$B_d = \begin{pmatrix} \frac{2k_f}{mv_x} \\ \frac{2k_f l_f}{I_z} \\ 0 \\ -\frac{2k_f m_s h}{I_x m} \end{pmatrix}, \quad C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

其中, $\beta_d$ 和 $\gamma_d$ 为理想的质心侧偏角和横摆角速度;

转向离心力产生的力矩为

$$M_S = m_s v_x (\dot{\beta}_d + \gamma_d) h \cos \phi_{vd} \quad (16)$$

重力产生的侧倾力矩为

$$M_G = m_s g h \sin \phi_v \quad (17)$$

由 $M_S = M_G$ 得车身主动内倾的理想侧倾角为

$$\phi_{vd} = \arctan \frac{v_x (\dot{\beta}_d + \gamma_d)}{g} \quad (18)$$

根据参考模型(15)和(18)式便获得理想的横摆角速度和车身侧倾角,侧向加速度和横

向载荷转移率LTR两个指标来评价车身的主动内倾效果,其中,主要是由三部分构成,为侧向加速度,重力加速度的分量和车体侧倾加速度,表示为

$$a_{per} = \ddot{y}\cos\phi_v + h\dot{\phi}_v - g\sin\phi_v \quad (19)$$

横向载荷转移率是常用的预测车辆非绊倒侧翻的指标表示为

$$LTR = \frac{m_s\ddot{y}h + I_x\ddot{\phi}_v - m_sgh\phi_v}{m_sgl_s}。$$

8. 根据权利要求1所述的一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法,其特征在于,还包括S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹,所述参考轨迹采用双移线参考轨迹作为差动转向无人车的跟踪轨迹,具体表达式如下:

$$\begin{cases} Y_{ref}(X) = \frac{d_{y1}}{2}(1 + \tanh(z_1)) - \frac{d_{y2}}{2}(1 + \tanh(z_2)) \\ \varphi_{ref}(X) = \arctan\left(d_{y1}\left(\frac{1}{\cosh(z_1)}\right)^2\left(\frac{1.2}{d_{x1}}\right) - d_{y2}\left(\frac{1}{\cosh(z_2)}\right)^2\left(\frac{1.2}{d_{x2}}\right)\right) \end{cases}$$

$$z_1 = \frac{2.4}{25}(X - 27.19) - 1.2, \quad z_2 = \frac{2.4}{21.95}(X - 56.45) - 1.2, \quad d_{x1} = 25, \quad d_{x2} =$$

21.95,  $d_{y1} = 4.05, d_{y2} = 4.05;$

所述参考轨迹由参考横向位置 $Y_{ref}$ 和参考横摆角 $\varphi_{ref}$ 构成,其中, $Y_{ref}$ 和 $\varphi_{ref}$ 都表示为关于横向位置X的非线性函数。

## 一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制领域,具体而言,涉及一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法。

### 背景技术

[0002] 中国发明专利/发明专利(申请号:CN202010998512.5)所提出的无人车及无人车救助系统,所述无人车包括,通讯单元,用于接收救助请求信号,所述救助请求信号携带救助对象的个人基本信息和位置信息,本申请能够更快速且有效地帮助急需救助的人,解决了突发情况下待救者在第一现场得不到及时救助的问题,为挽救人民群众生命财产安全争取了宝贵时间。

[0003] 但是现有的无人车无论在救援还是运输的过程中,在转向时容易出现侧翻的情况,同时无法在无人车进行转向的过程中进行对轨迹跟踪及姿态控制,因此我们对此做出改进,提出一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于:针对目前存在的背景技术提出的问题,为了实现上述发明目的,本发明提供了以下技术方案:一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法,以改善上述问题本申请具体是这样的:包括以下步骤:

[0005] S1建立三个车辆模型包括无人车差动转向模型、无人车侧倾车辆模型和参考模型;S11所述无人车差动转向模型包括纵向、侧向、横摆的动力学模型及运动学模型,用于通过模型预测控制跟踪特定轨迹,并获取所需的差动力矩以及由此产生的前轮转角;S12所述无人车侧倾模型用于通过滑模控制跟踪理想车身侧倾角;S13所述参考模型则主要为差动转向无人车的姿态控制提供理想的车身侧倾角;S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹;S3通过模型预测控制器实现差动转向,并通过控制无人车跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩 $M_z$ ;S4通过滑模控制器,即车身内倾控制器,控制差动转向无人车跟踪理想车身侧倾角,并通过指数趋近律的控制降低系统的抖动;S5对车辆模型进行仿真,并对仿真的结果进行分析。

[0006] 作为本申请优选的技术方案,步骤S1无人车差动转向模型,XOY为惯性坐标系,xoy为固定在车辆质心的车体坐标系,根据牛顿第二定律,分别得沿x轴、y轴和绕z轴的受力平衡方程式为:

$$[0007] \begin{cases} ma_y = m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\phi}) = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \\ m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\phi}) = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} - (F_{yfl} + F_{yfr})\delta_f \\ I_z\ddot{\phi} = l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{l_s}{r}M_z \end{cases} \quad (1)$$

$$[0008] F_{yfl} = F_{yfr} = k_f \alpha_f, F_{yrl} = F_{yrr} = k_r \alpha_r, F_{xfl} = F_{xfr} = k_{lf} s_f, F_{xrl} = F_{xrr} = k_{lr} s_r,$$



$$[0009] \quad \alpha_f = \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}}, \quad \alpha_r = \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}},$$

[0010] 其中,  $m$ 为车辆总质量,  $a_y$ 为 $y$ 轴方向车辆质心处的惯性加速度,  $\dot{y}$ 和 $\ddot{y}$ 为沿 $y$ 轴的侧向速度和加速度,  $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 为沿 $x$ 轴的纵向速度和加速度,  $\dot{\phi}$ 和 $\ddot{\phi}$ 为车辆的横摆角速度和角加速度,  $F_{yf1}$ 、 $F_{yfr}$ 、 $F_{yrl}$ 和 $F_{yrr}$ 分别为前后左右四个车轮的侧向力,  $F_{xf1}$ 、 $F_{xfr}$ 、 $F_{xrl}$ 和 $F_{xrr}$ 分别为前后左右四个车轮的纵向力,  $I_z$ 为车辆的横摆转动惯量,  $l_f$ 和 $l_r$ 分别为质心到前后轴的距离,  $l_s$ 为轮距的一半,  $k_f$ 和 $k_r$ 分别为前后轮侧偏刚度,  $\alpha_f$ 和 $\alpha_r$ 分别为前后轮侧偏角,  $k_{lf}$ 和 $k_{lr}$ 分别为前后轮纵向刚度,  $s_f$ 和 $s_r$ 分别为前后轮滑移率;

[0011] 由建立的运动学方程为

$$[0012] \quad \begin{cases} \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

[0013] 分布式直驱无人车的四个车轮内均安装轮毂电机, 两前轮毂电机可实现差动转向, 所谓差动转向是指通过同轴左右两轮的驱动力矩差来实现转向, 其结构如图2所示, 当驾驶员的意图通过方向盘提供给电控单元后, 电控单元就会分别给左右前轮的轮毂电机一个指令以产生大小不同的两个驱动力 $F_{xf1}$ 和 $F_{xfr}$ , 由于主销偏移距 $r_\sigma$ 的存在, 此二驱动力分别绕各自的主销产生使得车轮向车辆纵向中心线偏转的力矩 $\tau_{dr}$ 和 $\tau_{dl}$ , 当此二力矩相同时, 汽车直行; 当 $\tau_{dr} \neq \tau_{dl}$ 时, 两车轮在转向梯形机构的作用下就会向力矩小的一侧偏转, 从而实现差动转向;

[0014] 差动转向系统的动力学方程表示为

$$[0015] \quad J_e \ddot{\delta}_f + b_e \dot{\delta}_f = \tau_a + \frac{M_z}{r} r_\sigma - \tau_f \quad (3)$$

$$[0016] \quad \tau_a = \tau_{ar} + \tau_{al} = 2k_f \alpha_f l^2 / 3, M_z = T_{fl} - T_{fr} = (F_{xf1} - F_{xfr}) r,$$

[0017] 其中,  $J_e$ 和 $b_e$ 分别为转向系统的等效转动惯量和阻尼系数,  $\tau_{al}$ 和 $\tau_{ar}$ 分别为左右前轮的回正力矩,  $\tau_a$ 为前轮的总回正力矩,  $T_{fl}$ 和 $T_{fr}$ 分别为左右前轮的驱动力矩,  $F_{xf1}$ 和 $F_{xfr}$ 分别为左右前轮的纵向力,  $M_z$ 为左右前轮的差动力矩,  $r$ 为轮胎滚动半径,  $\tau_f$ 为转向系统的摩擦力,  $l$ 为前轮轮胎接地印迹的一半;

[0018] 综合(1)~(3)得到的无人车差动转向数学模型为

$$[0019] \quad \begin{cases} \dot{\delta}_f = \frac{2l_s^2 k_f}{3b_e} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + \frac{r_\sigma}{b_e r} M_z \\ \ddot{y} = -\dot{x} \dot{\phi} + \frac{2}{m} \left[ k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + k_r \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} \right] \\ \ddot{x} = \dot{y} \dot{\phi} + \frac{2}{m} \left[ k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + k_{lf} s_f + k_{lr} s_r \right] \\ \ddot{\phi} = \frac{1}{I_z} \left[ 2l_f k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) - 2l_r k_r \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} + \frac{l_s}{r} M_z \right] \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

[0020] 取状态变量为 $\chi(t) = [\delta_f \quad \dot{y} \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\phi} \quad Y \quad X]^T$ ,  $u(t) = M_z$ 时, 则方程(4)可表示为

$$[0021] \quad \dot{\chi}(t) = f(\chi(t), u(t)). \quad (5)$$

[0022] 作为本申请优选的技术方案, 步骤S1无人车侧倾模型, 考虑到车辆曲线行驶时, 位于悬架上的车身向外倾斜会导致内侧车轮垂直载荷的急剧减小, 当发生在前轮时极有能直接导致差动转向的失效, 严重时甚至会引发车辆的侧翻, 通过主动悬架将车身主动内倾至最佳角度使得重力分力与离心力平衡, 则能有效保证车辆差动转向的有效性以及转向时的稳定性, 建立的侧倾动力学方程为:

$$[0023] \quad I_x \ddot{\phi}_v = m_s a_y h + m_s g h \phi_v - c_v \dot{\phi}_v - k_v \phi_v + M_x \quad (6)$$

[0024] 其中,  $I_x$ 为车辆的侧倾转动惯量,  $\phi_v$ 、 $\dot{\phi}_v$ 和 $\ddot{\phi}_v$ 分别为侧倾角、角速度和角加速度,  $h$ 为质心位置处侧倾中心高度到车轴的侧倾中心高度的距离,  $m_s$ 为车辆簧上质量,  $g$ 为重力加速度,  $c_v$ 和 $k_v$ 为悬架的侧倾阻尼系数和侧倾刚度系数,  $M_x$ 为主动悬架提供的侧倾力矩;

[0025] 将(1)中的第一个方程带入, 得

$$[0026] \quad \ddot{\phi}_v = \frac{1}{I_x} \left[ \frac{2m_s k_f h}{m} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + \frac{2m_s k_r h}{m} \left( \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + m_s g h \phi_v - c_v \dot{\phi}_v - k_v \phi_v + M_x \right].$$

[0027] 作为本申请优选的技术方案, 步骤S1模型预测控制器用于控制无人车差动转向模型跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩 $M_z$ , 因此通过如下方法得到(5)的线性方程,

$$[0028] \quad \begin{cases} \dot{\chi}(t) = A(t)\chi(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)\chi(t) \end{cases}, \quad (7)$$

$$[0029] \quad A(t) = \frac{\partial f}{\partial \chi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{y}} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\phi}} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_v} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial X} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_7}{\partial \delta} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{y}} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial f_7}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\phi}} & \frac{\partial f_7}{\partial \phi_v} & \frac{\partial f_7}{\partial Y} & \frac{\partial f_7}{\partial X} \end{bmatrix}, \quad B(t) = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial M_z} & \frac{\partial f_1}{\partial M_x} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_7}{\partial M_z} & \frac{\partial f_7}{\partial M_x} \end{bmatrix},$$

$$[0030] \quad C(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

[0031] 对(7)采用一阶差商的方法进行离散化处理得到如下离散的状态空间表达式,

$$[0032] \quad x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k), \quad (8)$$

[0033] 其中,  $A(k) = I + TA(t)$ ,  $B(k) = TB(t)$ ,

[0034] 构建新的状态变量 $\xi(k) = [x(k) \quad u(k)]^T$ , 则(8)可表示为

$$[0035] \quad \begin{cases} \xi(k+1|t) = \tilde{A}(k)\xi(k|t) + \tilde{B}(k)\Delta u(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{C}(k)\xi(k|t) \end{cases},$$

$$[0036] \quad \tilde{A}(k) = \begin{bmatrix} A(k) & B(k) \\ 0_{1 \times 7} & I_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}(k) = \begin{bmatrix} B(k) \\ I_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

[0037] 则系统的预测输出方程可表示为

$$[0038] \quad Y(k+1|t) = \psi \xi(k|t) + \Theta \Delta U(k|t) \quad (9)$$

$$[0039] \quad Y(k+1|t) = \begin{bmatrix} \eta(k+1|t) \\ \eta(k+2|t) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p|t) \end{bmatrix}, \quad \Delta U(k|t) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|t) \\ \Delta u(k+1|t) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c|t) \end{bmatrix},$$

$$[0040] \quad \psi = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{A}_{k,1} \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,2} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_c} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p} \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B}_k & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{C}\tilde{A}_k\tilde{B}_k & \tilde{C}\tilde{B}_k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_c}\tilde{B}_k & \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_c-1}\tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}\tilde{B}_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p-1}\tilde{B}_k & \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p-2}\tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p-N_c-1}\tilde{B}_k \end{bmatrix},$$

[0041] 其中,  $N_p$  为预测时域,  $N_c$  为控制时域。

[0042] 作为本申请优选的技术方案,还包括滑模控制器模块,所述滑模控制器模块中滑模控制是一种鲁棒性很强的控制方法,有着快速响应、对外界变化扰动不敏感优点,通过指数趋近律的控制降低系统的抖动,基于滑模控制理论设计车身内倾控制器,依据建立的无人车侧倾模型和参考模型,设车身侧倾角与理想车身侧倾角的跟踪误差为  $e$ ,

$$[0043] \quad e = \phi_{vref} - \phi_v \quad (10)$$

[0044] 对车身侧倾角的控制选取如下的切换函数:

$$[0045] \quad s = ce + \dot{e} \quad (11)$$

[0046] 式中,  $c$  为需满足Hurwitz条件的控制器参数,其值大于零,

[0047] 取  $\dot{s} = 0$ , 即

$$[0048] \quad \dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{\phi}_{vref} - \ddot{\phi}_v = 0 \quad (12)$$

[0049] 将(6)中的无人车侧倾动力学方程式代入(12),得车身内倾的等效控制为:

$$[0050] \quad M_{x_{eq}} = -\frac{2k_f m_s h}{m} \delta + \frac{2(k_f + k_r) m_s h}{m} \beta - \frac{2(-k_f l_f + k_r l_r) m_s h}{mv_x} \gamma - (m_s g h - k_v) \phi_v + c_v \dot{\phi}_v + I_x (c\dot{e} + \ddot{\phi}_{vd}) \quad (13)$$

[0051] 为保证滑模到达条件成立,即  $s\dot{s} \leq -\eta|s|$ , ( $\eta > 0$ ),设计车身内倾的切换控制为:

$$[0052] \quad M_{xsw} = I_x (k+\eta) \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

[0053] 其中,  $k$  为控制器参数,其值大于零,

[0054] 则车身内倾的滑模控制律由等效控制项和切换控制项组成,即

$$[0055] \quad M_x = M_{x_{eq}} + M_{xsw}.$$

[0056] 作为本申请优选的技术方案,将目标函数转化为如下的标准二次型

$$[0057] \quad J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = [\Delta U(t)^T, \varepsilon]^T H [\Delta U(t)^T, \varepsilon] + G [\Delta U(t)^T, \varepsilon]$$

[0058] 其中,  $H = \begin{bmatrix} \Theta^T Q \Theta + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix}$ ,  $G = [2e_1^T Q \Theta \quad 0]$ ,  $e_1$  为预测时域内的跟踪误差, 约束条件设计为

$$[0059] \quad \begin{cases} \Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max} \\ U_{\min} \leq A\Delta U + U \leq U_{\max} \\ y_{h,\min} \leq y_h \leq y_{h,\max} \\ y_{s,\min} - \varepsilon \leq y_s \leq y_{s,\max} + \varepsilon \end{cases}$$

[0060] 目标函数和约束条件, 通过matlab的quadprog函数即完成二次规划问题的求解, 得到差动转向无人车跟踪参考轨迹所需的差动力矩  $M_z$ 。

[0061] 作为本申请优选的技术方案, 步骤S3通过模型预测控制器实现差动转向, 通过控制无人车跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩  $M_z$ , 期望无人车快速平稳地追踪上期望轨迹设置目标函数为:

$$[0062] \quad J(k) = Q \sum_{i=1}^{N_p} \|\Delta \eta(k+i|t)\|^2 + R \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(k+i|t)\|^2 + \rho \varepsilon^2$$

[0063] 其中,  $\Delta \eta(k+i|t)$  为实际系统和参考系统状态之间的跟踪误差,  $\Delta U(k+i|t)$  为差动力矩的控制增量,  $Q$ 、 $R$  和  $\rho$  均为权重系数,  $\varepsilon$  为松弛因子。

[0064] 作为本申请优选的技术方案, 步骤S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹中从无人车差动转向模型中引出横向位置  $X$  以获得模型预测控制目标函数所需的参考轨迹  $Y_{\text{ref}}$  和  $\varphi_{\text{ref}}$ , 并同时提供相关的状态变量  $x$  给约束条件, 即可通过优化求解得到差动转向无人车跟踪特定行驶轨迹所需的差动力矩  $M_z$ , 此外, 再通过滑模控制器使得如(7)所示的无人车侧倾车辆模型具有和参考模型完全相同的车身内倾角, 并由此获得控制车辆所需的侧倾力矩  $M_x$ , 将获得的差动力矩  $M_z$  和侧倾力矩  $M_x$  分别输入给无人车差动转向模型和无人车侧倾车辆模型, 即可得到状态变量  $x$ , 前轮转角  $\delta_f$  以及车身内倾角  $\phi_v$ , 其中, 前轮转角用于提供给参考模型以得到理想的车身内倾角  $\phi_{\text{vref}}$ , 车身内倾角  $\phi_v$  则与理想车身内倾角  $\phi_{\text{vref}}$  用于产生滑模控制所需的跟踪误差  $e$ , 如此便可构成闭环控制系统。

[0065] 步骤S13所述参考模型是为后续控制策略研究中提供所需的理想车身侧倾角, 要求模型不能太复杂, 故采用线性三自由度车辆模型作为参考模型, 即忽略转向系统影响和悬架作用, 仅考虑车辆的侧向、横摆和侧倾运动, 同时对轮胎线性化处理:

[0066] 设状态空间变量为  $x_d(t) = [\beta_d \quad \gamma_d \quad \phi_v \quad \dot{\phi}_v]^T$ , 系统输入为前轮转角  $\delta_f$ , 即  $u_2(t) = \delta_f$ , 则参考模型表示为:

$$[0067] \quad \begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_2 \\ y_d = C_d x_d + D_d u_2 \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 [0068] \quad A_d &= \begin{pmatrix} -\frac{2(k_f + k_r)}{mv_x} & -1 + \frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)}{mv_x^2} & 0 & 0 \\ \frac{-2k_f l_f + 2k_r l_r}{I_z} & -\frac{2k_f l_f^2 + 2k_r l_r^2}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2(k_f + k_r)m_s h}{I_x m} & -\frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)m_s h}{I_x m v_x} & \frac{m_s g h - k_v}{I_x} & -\frac{c_v}{I_x} \end{pmatrix}, \\
 [0069] \quad B_d &= \begin{pmatrix} \frac{2k_f}{mv_x} \\ \frac{2k_f l_f}{I_z} \\ 0 \\ -\frac{2k_f m_s h}{I_x m} \end{pmatrix}, \quad C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

[0070] 其中,  $\beta_d$  和  $\gamma_d$  为理想的质心侧偏角和横摆角速度;

[0071] 转向离心力产生的力矩为

$$[0072] \quad M_S = m_s v_x (\dot{\beta}_d + \gamma_d) h \cos \phi_{vd} \quad (16)$$

[0073] 重力产生的侧倾力矩为

$$[0074] \quad M_G = m_s g h \sin \phi_v \quad (17)$$

[0075] 由  $M_S = M_G$  得车身主动内倾的理想侧倾角为

$$[0076] \quad \phi_{vd} = \arctan \frac{v_x (\dot{\beta}_d + \gamma_d)}{g} \quad (18)$$

[0077] 于是, 根据参考模型 (15) 和 (18) 是便获得理想的横摆角速度和车身侧倾角,

[0078] 本文采用乘员感知侧向加速度和横向载荷转移率LTR两个指标来评价车身的主动内倾效果, 其中, 乘员感知侧向加速度对车辆的乘坐舒适性有一定的影响, 其主要是由三部分构成[48], 即侧向加速度, 重力加速度的分量和车体侧倾加速度, 表示为:

$$[0079] \quad a_{per} = \ddot{y} \cos \phi_v + h \dot{\phi}_v - g \sin \phi_v \quad (19)$$

[0080] 横向载荷转移率是常用的预测车辆非绊倒侧翻的指标表示为

$$[0081] \quad LTR = \frac{m_s \ddot{y} h + I_x \ddot{\phi}_v - m_s g h \phi_v}{m_s g l_s};$$

[0082] S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹, 所述参考轨迹采用双移线参考轨迹作为差动转向无人车的跟踪轨迹, 具体表达式如下:

$$[0083] \quad \begin{cases} Y_{ref}(X) = \frac{d_{y1}}{2}(1 + \tanh(z_1)) - \frac{d_{y2}}{2}(1 + \tanh(z_2)) \\ \varphi_{ref}(X) = \arctan(d_{y1}(\frac{1}{\cosh(z_1)})^2(\frac{1.2}{d_{x1}}) - d_{y2}(\frac{1}{\cosh(z_2)})^2(\frac{1.2}{d_{x2}})) \end{cases}$$

$$[0084] \quad z_1 = \frac{2.4}{25}(X - 27.19) - 1.2, \quad z_2 = \frac{2.4}{21.95}(X - 56.45) - 1.2, \quad d_{x1} = 25, \quad d_{x2} = 21.95, \quad d_{y1} = 4.05, \quad d_{y2} = 4.05;$$

[0085] 所述参考轨迹由参考横向位置 $Y_{ref}$ 和参考横摆角 $\varphi_{ref}$ 构成,其中, $Y_{ref}$ 和 $\varphi_{ref}$ 都表示为关于横向位置 $X$ 的非线性函数。

[0086] 与现有技术相比,本发明的有益效果:在本申请的方案中:通过差动转向实现无人车轨迹跟踪的同时,也提出了对车身姿态的控制以提高差动转向无人车的操纵稳定性,首先建立了差动转向无人车的动力学和运动学模型以及无人车侧倾模型,选取线性三自由度车辆模型作为参考模型以得到理想的车身侧倾角,给定参考轨迹,通过模型预测控制器控制无人车差动转向模型跟踪给定的参考轨迹,以得到所需的差动力矩以及由此产生的前轮转角,设计了滑模控制器控制无人车侧倾模型跟踪理想车身侧倾角,并得到所需的侧倾力矩,仿真结果表明,模型预测控制和滑模控制器能使得差动转向无人车实现轨迹跟踪的同时也能实现车身姿态的控制。

#### 附图说明:

- [0087] 图1为本申请提供的控制框图;
- [0088] 图2为本申请提供的差动转向无人车动力学模型图;
- [0089] 图3为本申请提供的差动转向图;
- [0090] 图4为本申请提供的无人车侧倾动力学模型图;
- [0091] 图5为本申请提供的差动转向无人车和参考轨迹的对比曲线图;
- [0092] 图6为本申请提供的差动力矩曲线图;
- [0093] 图7为本申请提供的前轮转角曲线图;
- [0094] 图8为本申请提供的有无侧倾控制的差动转向无人车和理想车身侧倾角的对比曲线图;
- [0095] 图9为本申请提供的侧倾力矩曲线图;
- [0096] 图10为本申请无侧倾控制差动转向无人车感知侧向加速度对比曲线图;
- [0097] 图11为本申请有无侧倾控制差动转向无人车横向载荷转移率对比曲线图。

#### 具体实施方式

[0098] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整的描述。显然,所描述的实施例是本发明的一种具体实施方式,不限于全部的实施例。

[0099] 实施例:请参阅图1-11,一种差动转向无人车轨迹跟踪及姿态控制方法,包括以下步骤:S1建立三个车辆模型包括无人车差动转向模型、无人车侧倾模型和参考模型;S11所

述无人车差动转向模型包括纵向、侧向、横摆的动力学模型及运动学模型,用于通过模型预测控制跟踪特定轨迹,并获取所需的差动力矩以及由此产生的前轮转角;S12所述无人车侧倾模型用于通过滑模控制跟踪理想车身侧倾角;S13所述参考模型则主要为差动转向无人车的姿态控制提供理想的车身侧倾角;S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹;S3通过模型预测控制器实现差动转向,并通过控制无人车跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩 $M_z$ ;S4通过滑模控制器,即车身内倾控制器,控制差动转向无人车跟踪理想车身侧倾角,并通过指数趋近律的控制降低系统的抖动;S5对车辆模型进行仿真,并对仿真的结果进行分析。

[0100] 作为本申请优选的技术方案,步骤S1无人车差动转向模型,XOY为惯性坐标系,xoy为固定在车辆质心的车体坐标系,根据牛顿第二定律,分别得沿x轴、y轴和绕z轴的受力平衡方程式为:

$$[0101] \quad \begin{cases} ma_y = m(\dot{y} + \dot{x}\dot{\phi}) = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \\ m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\phi}) = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} - (F_{yfl} + F_{yfr})\delta_f \\ I_z\ddot{\phi} = l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{l_s}{r}M_z \end{cases} \quad (1)$$

$$[0102] \quad F_{yfl} = F_{yfr} = k_f\alpha_f, F_{yrl} = F_{yrr} = k_r\alpha_r, F_{xfl} = F_{xfr} = k_{lf}s_f, F_{xrl} = F_{xrr} = k_{lr}s_r,$$

$$[0103] \quad \alpha_f = \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}, \quad \alpha_r = \frac{-\dot{y} + l_r\dot{\phi}}{\dot{x}},$$

[0104] 其中,m为车辆总质量, $a_y$ 为y轴方向车辆质心处的惯性加速度, $\dot{y}$ 和 $\ddot{y}$ 为沿y轴的侧向速度和加速度, $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 为沿x轴的纵向速度和加速度, $\dot{\phi}$ 和 $\ddot{\phi}$ 为车辆的横摆角速度和角加速度, $F_{yfl}$ 、 $F_{yfr}$ 、 $F_{yrl}$ 和 $F_{yrr}$ 分别为前后左右四个车轮的侧向力, $F_{xfl}$ 、 $F_{xfr}$ 、 $F_{xrl}$ 和 $F_{xrr}$ 分别为前后左右四个车轮的纵向力, $I_z$ 为车辆的横摆转动惯量, $l_f$ 和 $l_r$ 分别为质心到前后轴的距离, $l_s$ 为轮距的一半, $k_f$ 和 $k_r$ 分别为前后轮侧偏刚度, $\alpha_f$ 和 $\alpha_r$ 分别为前后轮侧偏角, $k_{lf}$ 和 $k_{lr}$ 分别为前后轮纵向刚度, $s_f$ 和 $s_r$ 分别为前后轮滑移率,

[0105] 由建立的运动学方程为

$$[0106] \quad \begin{cases} \dot{Y} = \dot{x}\sin\varphi + \dot{y}\cos\varphi \\ \dot{X} = \dot{x}\cos\varphi - \dot{y}\sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

[0107] 分布式直驱无人车的四个车轮内均安装轮毂电机,两前轮毂电机可实现差动转向,所谓差动转向是指通过同轴左右两轮的驱动力矩差来实现转向,其结构如图2所示,当驾驶员的意图通过方向盘提供给电控单元后,电控单元就会分别给左右前轮的轮毂电机一个指令以产生大小不同的两个驱动力 $F_{xfl}$ 和 $F_{xfr}$ ,由于主销偏移距 $r_o$ 的存在,此二驱动力分别绕各自的主销产生使得车轮向车辆纵向中心线偏转的力矩 $\tau_{dr}$ 和 $\tau_{dl}$ ,当此二力矩相时,汽车直行;当 $\tau_{dr} \neq \tau_{dl}$ 时,两车轮在转向梯形机构的作用下就会向力矩小的一侧偏转,从而实现差动转向;

[0108] 差动转向系统的动力学方程表示为

$$[0109] \quad J_e \ddot{\delta}_f + b_e \dot{\delta}_f = \tau_a + \frac{M_z}{r} r_\sigma - \tau_f \quad (3)$$

$$[0110] \quad \tau_a = \tau_{ar} + \tau_{al} = 2k_f \alpha_f l^2 / 3, M_z = T_{fl} - T_{fr} = (F_{xf1} - F_{xfr}) r,$$

[0111] 其中,  $J_e$  和  $b_e$  分别为转向系统的等效转动惯量和阻尼系数,  $\tau_{al}$  和  $\tau_{ar}$  分别为左右前轮的回正力矩,  $\tau_a$  为前轮的总回正力矩,  $T_{fl}$  和  $T_{fr}$  分别为左右前轮的驱动力矩,  $F_{xf1}$  和  $F_{xfr}$  分别为左右前轮的纵向力,  $M_z$  为左右前轮的差动力矩,  $r$  为轮胎滚动半径,  $\tau_f$  为转向系统的摩擦力,  $l$  为前轮轮胎接地印迹的一半,

[0112] 综合(1)~(3)得到的无人车差动转向数学模型为

$$[0113] \quad \begin{cases} \dot{\delta}_f = \frac{2l_s^2 k_f}{3b_e} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + \frac{r_\sigma}{b_e r} M_z \\ \ddot{y} = -\dot{x} \dot{\phi} + \frac{2}{m} \left[ k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + k_r \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} \right] \\ \ddot{x} = \dot{y} \dot{\phi} + \frac{2}{m} \left[ k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + k_{y'} s_f + k_{y''} s_r \right] \\ \ddot{\phi} = \frac{1}{I_z} \left[ 2l_f k_f \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) - 2l_r k_r \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} + \frac{l_s}{r} M_z \right] \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

[0114] 取状态变量为  $\chi(t) = [\delta_f \quad \dot{y} \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\phi} \quad Y \quad X]^T$ ,  $u(t) = M_z$  时, 则方程(4)可表示为

$$[0115] \quad \dot{\chi}(t) = f(\chi(t), u(t)) \quad (5)$$

[0116] 步骤S1无人车侧倾模型, 考虑到车辆曲线行驶时, 位于悬架上的车身向外倾斜会导致内侧车轮垂直载荷的急剧减小, 当发生在前轮时极有能直接导致差动转向的失效, 严重时甚至会引发车辆的侧翻, 通过主动悬架将车身主动内倾至最佳角度使得重力分力与离心力平衡, 则能有效保证车辆差动转向的有效性以及转向时的稳定性, 建立的侧倾动力学方程为:

$$[0117] \quad I_x \ddot{\phi}_v = m_s a_y h + m_s g h \phi_v - c_v \dot{\phi}_v - k_v \phi_v + M_x \quad (6)$$

[0118] 其中,  $I_x$  为车辆的侧倾转动惯量,  $\phi_v$ 、 $\dot{\phi}_v$  和  $\ddot{\phi}_v$  分别为侧倾角、角速度和角加速度,  $h$  为质心位置处侧倾中心高度到车轴的侧倾中心高度的距离,  $m_s$  为车辆簧上质量,  $g$  为重力加速度,  $c_v$  和  $k_v$  为悬架的侧倾阻尼系数和侧倾刚度系数,  $M_x$  为主动悬架提供的侧倾力矩,

[0119] 将(1)中的第一个方程带入, 得

$$[0120] \quad \ddot{\phi}_v = \frac{1}{I_x} \left[ \frac{2m_s k_f h}{m} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + \frac{2m_s k_r h}{m} \left( \frac{-\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} \right) + m_s g h \phi_v - c_v \dot{\phi}_v - k_v \phi_v + M_x \right]$$

[0121] 作为本申请优选的技术方案, 步骤S1模型预测控制器用于控制差动转向无人车跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩  $M_z$ , 因此通过如下方法得到(5)的线性方程,



$$[0122] \quad \begin{cases} \dot{\chi}(t) = A(t)\chi(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)\chi(t) \end{cases}, \quad (7)$$

$$[0123] \quad A(t) = \frac{\partial f}{\partial \chi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\varphi}} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_v} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\phi}_v} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial X} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_7}{\partial \delta} & \frac{\partial f_7}{\partial y} & \frac{\partial f_7}{\partial x} & \frac{\partial f_7}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\varphi}} & \frac{\partial f_7}{\partial \phi_v} & \frac{\partial f_7}{\partial \dot{\phi}_v} & \frac{\partial f_7}{\partial Y} & \frac{\partial f_7}{\partial X} \end{bmatrix}, \quad B(t) = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial M_z} & \frac{\partial f_1}{\partial M_x} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_7}{\partial M_z} & \frac{\partial f_7}{\partial M_x} \end{bmatrix},$$

$$[0124] \quad C(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

[0125] 对(7)采用一阶差商的方法进行离散化处理得到如下离散的状态空间表达式

$$[0126] \quad x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k), \quad (8)$$

[0127] 其中,  $A(k) = I + TA(t)$ ,  $B(k) = TB(t)$ ,

[0128] 构建新的状态变量  $\xi(k) = [x(k) \quad u(k)]^T$ , 则(8)可表示为

$$[0129] \quad \begin{cases} \xi(k+1|t) = \tilde{A}(k)\xi(k|t) + \tilde{B}(k)\Delta u(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{C}(k)\xi(k|t) \end{cases},$$

$$[0130] \quad \tilde{A}(k) = \begin{bmatrix} A(k) & B(k) \\ 0_{1 \times 7} & I_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}(k) = \begin{bmatrix} B(k) \\ I_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

[0131] 则系统的预测输出方程可表示为

$$[0132] \quad Y(k+1|t) = \psi\xi(k|t) + \Theta \Delta U(k|t) \quad (9)$$

$$[0133] \quad Y(k+1|t) = \begin{bmatrix} \eta(k+1|t) \\ \eta(k+2|t) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p|t) \end{bmatrix}, \quad \Delta U(k|t) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|t) \\ \Delta u(k+1|t) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c|t) \end{bmatrix},$$

$$[0134] \quad \psi = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{A}_{k,1} \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,2} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_c} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p} \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B}_k & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{C}\tilde{A}_k\tilde{B}_k & \tilde{C}\tilde{B}_k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_c}\tilde{B}_k & \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_c-1}\tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}\tilde{B}_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p-1}\tilde{B}_k & \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p-2}\tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}_{k,N_p-N_c-1}\tilde{B}_k \end{bmatrix},$$

[0135] 其中,  $N_p$  为预测时域,  $N_c$  为控制时域。

[0136] 还包括滑模控制器模块, 所述滑模控制器模块中滑模控制是一种鲁棒性很强的控制方法, 有着快速响应、对外界变化扰动不敏感优点, 通过指数趋近律的控制降低系统的抖动, 基于滑模控制理论设计车身内倾控制器, 依据建立的无人车侧倾模型和参考模型, 设车身侧倾角与理想车身侧倾角的跟踪误差为  $e$ ,

[0137]  $e = \phi_{vref} - \phi_v$  (10)

[0138] 对车身外倾角的控制选取如下的切换函数:

[0139]  $s = ce + \dot{e}$  (11)

[0140] 式中,  $c$  为需满足Hurwitz条件的控制器参数, 其值大于零,

[0141] 取  $\dot{s} = 0$ , 即

[0142]  $\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{\phi}_{vref} - \ddot{\phi}_v = 0$  (12)

[0143] 将(6)中的无人车侧倾动力学方程式代入(12), 得车身侧倾的等效控制为:

[0144] 
$$M_{xeq} = -\frac{2k_f m_s h}{m} \delta + \frac{2(k_f + k_r) m_s h}{m} \beta - \frac{2(-k_f l_f + k_r l_r) m_s h}{mv_x} \gamma - (m_s g h - k_v) \phi_v + c_v \dot{\phi}_v + I_x (c\dot{e} + \ddot{\phi}_{vd})$$
 (13)

[0145] 为保证滑模到达条件成立, 即  $s\dot{s} \leq -\eta|s|$ , ( $\eta > 0$ ), 设计车身侧倾的切换控制为:

[0146]  $M_{xsw} = I_x (k + \eta) \text{sgn}(s)$  (14)

[0147] 其中,  $k$  为控制器参数, 其值大于零,

[0148] 则车身侧倾的滑模控制律由等效控制项和切换控制项组成, 即

[0149]  $M_x = M_{xeq} + M_{xsw}$ 。

[0150] 作为本申请优选的技术方案, 将目标函数转化为如下的标准二次型

[0151]  $J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = [\Delta U(t)^T, \varepsilon]^T H [\Delta U(t)^T, \varepsilon] + G [\Delta U(t)^T, \varepsilon]$

[0152] 其中,  $H = \begin{bmatrix} \Theta^T Q \Theta + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix}$ ,  $G = [2e_1^T Q \Theta \quad 0]$ ,  $e_1$  为预测时域内的跟踪误差, 约束条件设计为

[0153] 
$$\begin{cases} \Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max} \\ U_{\min} \leq A\Delta U + U \leq U_{\max} \\ y_{h,\min} \leq y_h \leq y_{h,\max} \\ y_{s,\min} - \varepsilon \leq y_s \leq y_{s,\max} + \varepsilon \end{cases}$$

[0154] 目标函数和约束条件, 通过matlab的quadprog函数即完成二次规划问题的求解, 得到差动转向无人车跟踪参考轨迹所需的差动力矩  $M_z$ 。

[0155] 步骤S3通过模型预测控制器实现差动转向, 控制无人车跟踪特定的行驶轨迹以得到所需的差动力矩  $M_z$ , 期望无人车快速平稳地追踪上期望轨迹设置目标函数:

[0156] 
$$J(k) = Q \sum_{i=1}^{N_p} \|\Delta \eta(k+i|t)\|^2 + R \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(k+i|t)\|^2 + \rho \varepsilon^2$$

[0157] 其中,  $\Delta \eta(k+i|t)$  为实际系统和参考系统状态之间的跟踪误差,  $\Delta U(k+i|t)$  为差动力矩的控制增量,  $Q$ 、 $R$  和  $\rho$  均为权重系数,  $\varepsilon$  为松弛因子。

[0158] 步骤S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹中从无人车差动转向模型中引出横向位置  $X$  以获得模型预测控制目标函数所需的参考轨迹  $Y_{ref}$  和  $\phi_{ref}$ , 并同时提供相关的状态变量  $x$  给约束条件, 即可通过优化求解得到差动转向无人车跟踪特定行驶轨迹所需的差动力矩  $M_z$ , 此外, 再通过滑模控制器使得如(7)所示的无人车侧倾车辆模型具有和参考模型

完全相同的车身内倾角,并由此获得控制车辆所需的侧倾力矩 $M_x$ ,将获得的差动力矩 $M_z$ 和侧倾力矩 $M_x$ 分别输入给无人车差动转向模型和无人车侧倾车辆模型,即可得到状态变量 $x$ ,前轮转角 $\delta_f$ 以及车身内倾角 $\phi_v$ ,其中,前轮转角用于提供给参考模型以得到理想的车身内倾角 $\phi_{vref}$ ,车身内倾角 $\phi_v$ 则与理想车身内倾角 $\phi_{vref}$ 用于产生滑模控制所需的跟踪误差 $e$ ,如此便可构成闭环控制系统。

[0159] 步骤S13所述参考模型是为后续控制策略研究中提供所需的理想车身侧倾角,要求模型不能太复杂,故采用线性三自由度车辆模型作为参考模型,即忽略转向系统影响和悬架作用,仅考虑车辆的侧向、横摆和侧倾运动,同时对轮胎线性化处理:

[0160] 设状态空间变量为 $x_d(t) = [\beta_d \quad \gamma_d \quad \phi_v \quad \dot{\phi}_v]^T$ ,系统输入为前轮转角 $\delta_f$ ,即 $u_2(t) = \delta_f$ ,则参考模型表示为:

$$[0161] \quad \begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_2 \\ y_d = C_d x_d + D_d u_2 \end{cases}, \quad (15)$$

$$[0162] \quad A_d = \begin{pmatrix} -\frac{2(k_f + k_r)}{mv_x} & -1 + \frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)}{mv_x^2} & 0 & 0 \\ \frac{-2k_f l_f + 2k_r l_r}{I_z} & -\frac{2k_f l_f^2 + 2k_r l_r^2}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2(k_f + k_r)m_s h}{I_x m} & -\frac{2(-k_f l_f + k_r l_r)m_s h}{I_x m v_x} & \frac{m_s g h - k_v}{I_x} & -\frac{c_v}{I_x} \end{pmatrix},$$

$$[0163] \quad B_d = \begin{pmatrix} \frac{2k_f}{mv_x} \\ \frac{2k_f l_f}{I_z} \\ 0 \\ -\frac{2k_f m_s h}{I_x m} \end{pmatrix}, \quad C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

[0164] 其中, $\beta_d$ 和 $\gamma_d$ 为理想的质心侧偏角和横摆角速度;

[0165] 转向离心力产生的力矩为

$$[0166] \quad M_S = m_s v_x (\dot{\beta}_d + \gamma_d) h \cos \phi_{vd} \quad (16)$$

[0167] 重力产生的侧倾力矩为

$$[0168] \quad M_G = m_s g h \sin \phi_v \quad (17)$$

[0169] 由 $M_S = M_G$ 得车身主动内倾的理想侧倾角为

$$[0170] \quad \phi_{vd} = \arctan \frac{v_x (\dot{\beta}_d + \gamma_d)}{g} \quad (18)$$

[0171] 根据参考模型(15)和(18)是便获得理想的横摆角速度和车身侧倾角,

[0172] 本文采用乘员感知侧向加速度和横向载荷转移率LTR两个指标来评价车身的主动内倾效果,其中,乘员感知侧向加速度对车辆的乘坐舒适性有一定的影响,其主要是由三部分构成[48],即侧向加速度,重力加速度的分量和车体侧倾加速度,表示为:

$$[0173] \quad a_{per} = \ddot{y} \cos \phi_v + h \dot{\phi}_v - g \sin \phi_v \quad (19)$$

[0174] 横向载荷转移率是常用的预测车辆非绊倒侧翻的指标表示为

$$[0175] \quad LTR = \frac{m_s \ddot{y} h + I_x \ddot{\phi}_v - m_s g h \phi_v}{m_s g l_s};$$

[0176] S2建立参考轨迹用于产生特定的行驶轨迹,所述参考轨迹采用双移线参考轨迹作为差动转向无人车的跟踪轨迹,具体表达式如下:

$$[0177] \quad \begin{cases} Y_{ref}(X) = \frac{d_{y1}}{2}(1 + \tanh(z_1)) - \frac{d_{y2}}{2}(1 + \tanh(z_2)) \\ \phi_{ref}(X) = \arctan(d_{y1}(\frac{1}{\cosh(z_1)})^2(\frac{1.2}{d_{x1}}) - d_{y2}(\frac{1}{\cosh(z_2)})^2(\frac{1.2}{d_{x2}})) \end{cases},$$

$$[0178] \quad z_1 = \frac{2.4}{25}(X - 27.19) - 1.2, \quad z_2 = \frac{2.4}{21.95}(X - 56.45) - 1.2, \quad d_{x1} = 25, d_{x2} = 21.95, d_{y1} = 4.05, d_{y2} = 4.05;$$

[0179] 所述参考轨迹由参考横向位置 $Y_{ref}$ 和参考横摆角 $\phi_{ref}$ 构成,其中, $Y_{ref}$ 和 $\phi_{ref}$ 都表示为关于横向位置X的非线性函数。

[0180] 以上实施例仅用以说明本发明而并非限制本发明所描述的技术方案,尽管本说明书参照上述的各个实施例对本发明已进行了详细的说明,但本发明不局限于上述具体实施方式,因此任何对本发明进行修改或等同替换;而一切不脱离发明的精神和范围的技术方案及其改进,其均涵盖在本发明的权利要求范围当中。

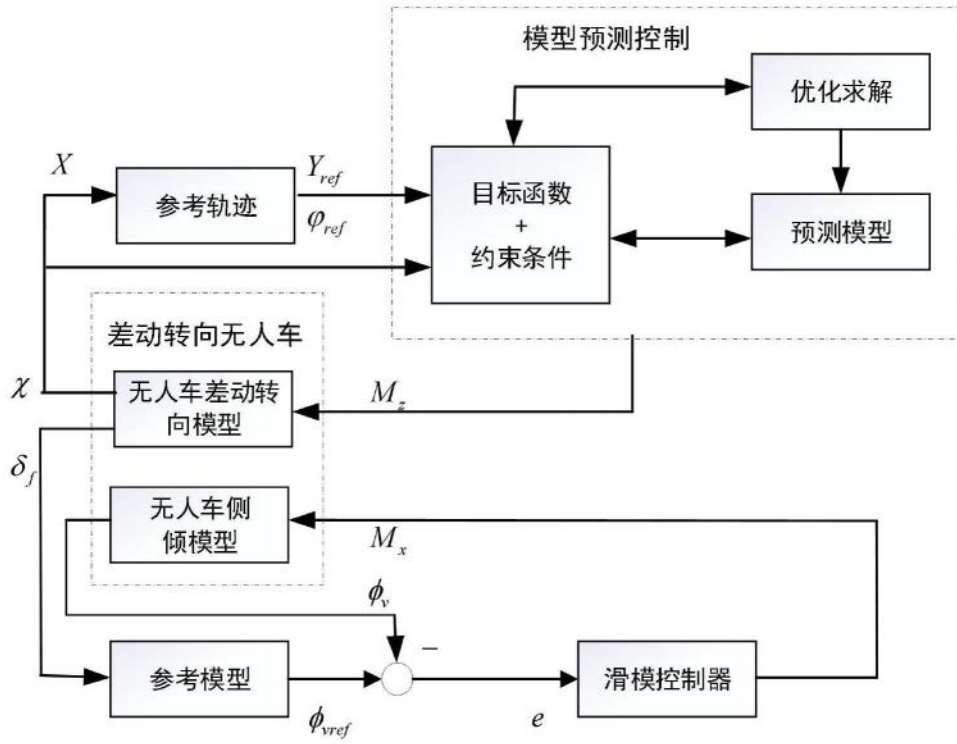


图1

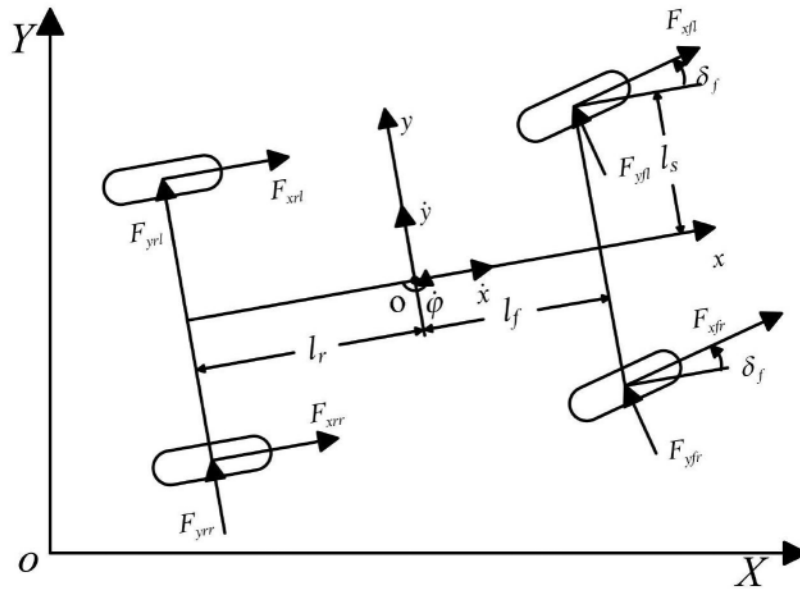


图2

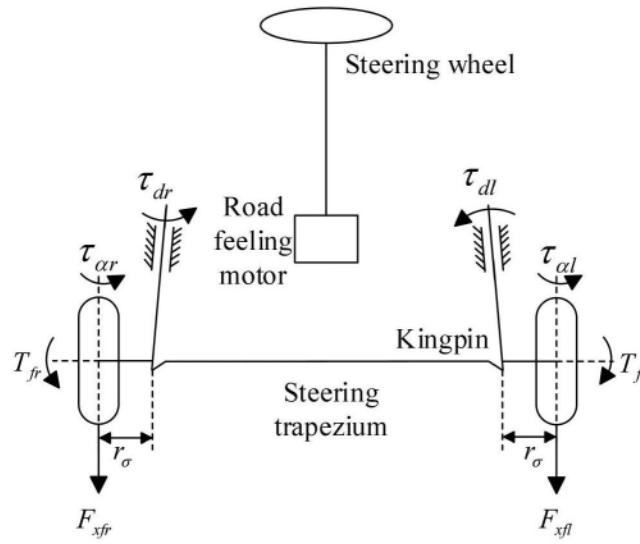


图3

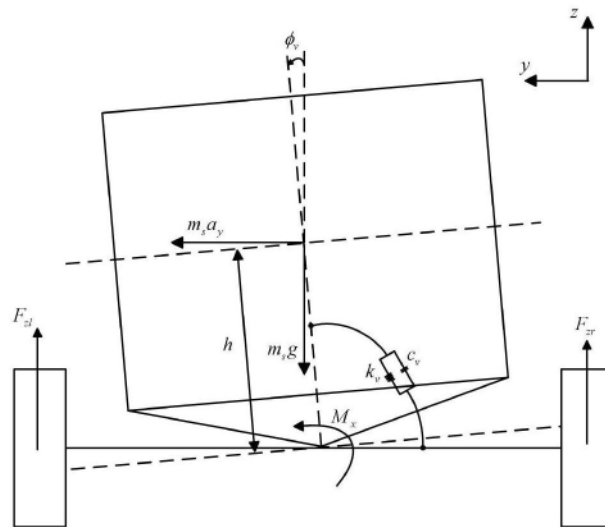


图4

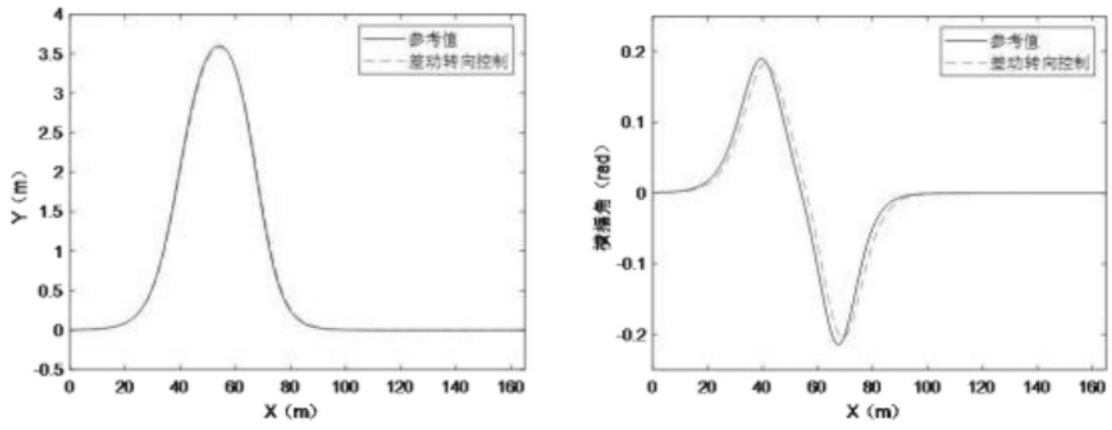


图5

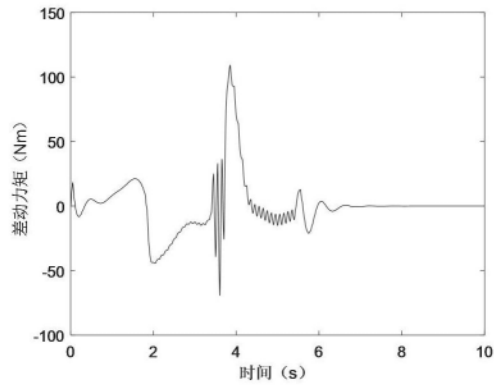


图6

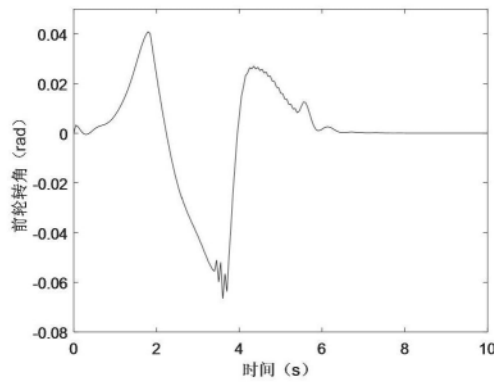


图7

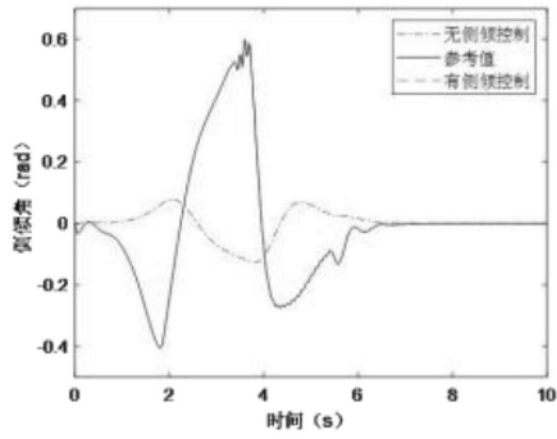


图8

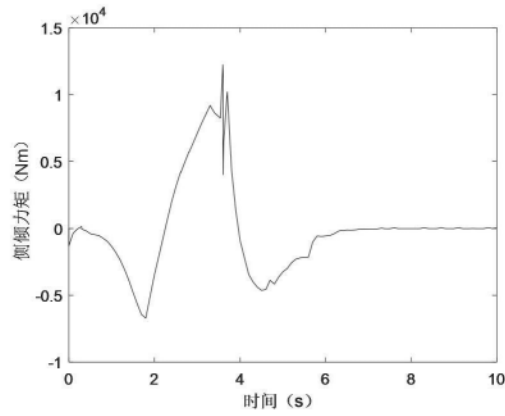


图9

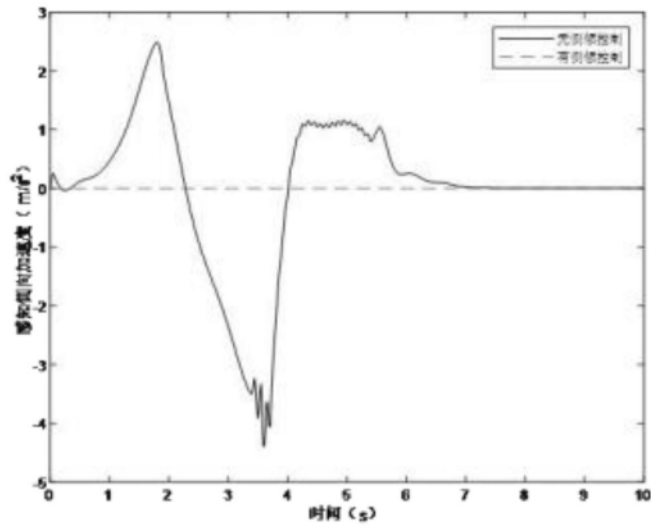


图10



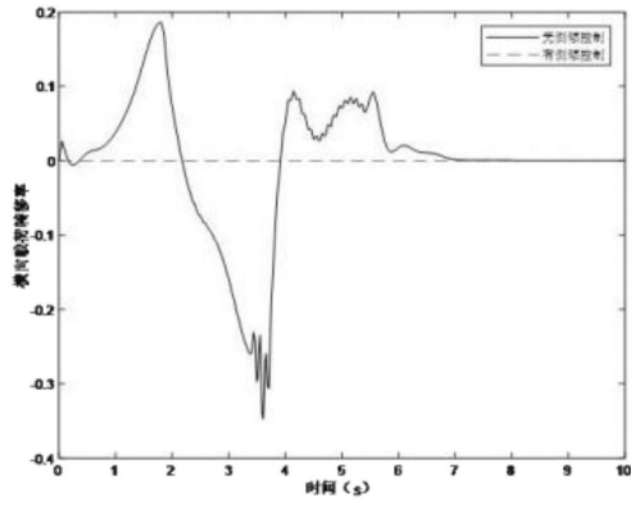


图11