



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111806427 B

(45) 授权公告日 2021. 10. 08

(21) 申请号 202010514532.2

B60L 15/32 (2006.01)

(22) 申请日 2020.06.08

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 109774791 A, 2019.05.21

申请公布号 CN 111806427 A

DE 102014211061 A1, 2016.01.21

(43) 申请公布日 2020.10.23

CN 108454623 A, 2018.08.28

(73) 专利权人 北京理工大学

CN 105109477 A, 2015.12.02

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

WO 2019053680 A1, 2019.03.21

CN 110228462 A, 2019.09.13

审查员 李洪宇

(72) 发明人 翟丽 侯宇涵 侯如非 张雪莹

(74) 专利代理机构 北京市诚辉律师事务所

11430

代理人 范盈

(51) Int. Cl.

B60W 30/02 (2012.01)

B60W 50/00 (2006.01)

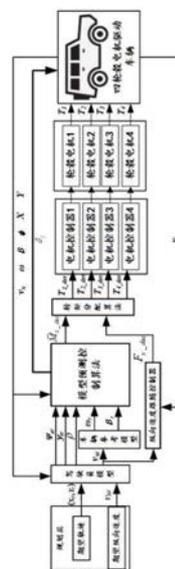
权利要求书6页 说明书13页 附图3页

(54) 发明名称

一种四轮电机驱动车辆的综合控制方法

(57) 摘要

一种四轮电机驱动车辆的综合控制方法，其结合了变预瞄距离运动学模型获取当前状态与期望轨迹的航向角偏差与侧向位移偏差，建立模型预测控制器状态方程，使被控车辆的运动状态更符合实际驾驶员操纵特性，提高轨迹跟踪的鲁棒性。在转向过程中，能够实现对横摆角速度以及质心侧偏角的控制，以及操纵稳定性与轨迹跟踪的综合控制。得到期望纵向力与期望额外横摆力矩，进而通过转矩分配算法得到四轮电机转矩最优控制序列。考虑底层力矩分配算法，对分布式驱动车辆轨迹跟踪与操纵稳定性相关执行器进行控制，提高了控制的准确性与鲁棒性，并实现了纵横向耦合控制。



1. 一种四轮毂电机驱动车辆的综合控制方法,其特征在于:具体包括以下步骤:

步骤一、针对四轮毂电机驱动车辆,建立轨迹跟踪变预瞄距离运动学模型与三自由度动力学模型;

步骤二、确定待跟踪的期望轨迹上的状态量:航向角偏差,侧向偏差,质心侧偏角以及横摆角速度,并设置各状态量的参考值;

步骤三、确定由步骤一中所建立的两个模型共同组成的四轮毂驱动电机驱动车辆的模型预测控制器状态方程;

步骤四、基于步骤三中所建立的状态方程确定预测输出方程,根据预测输出量与期望输出量参考值建立多目标优化函数,设置满足机械限制、控制平顺性、操纵稳定性的相关控制量约束条件,实时滚动优化获得前轮转角与额外横摆力矩的最优控制量;

步骤五、根据实际纵向车速 v_x 与纵向车速参考值 v_{x1} 的偏差,用PID控制方法得到期望车辆总纵向驱动力 F_{x-des} ,满足车辆对纵向车速参考值的跟踪;

步骤六、进行底层力矩分配,根据期望纵向驱动力以及期望额外横摆力矩得到期望四轮转矩,将指令分配到四个电机控制器,实现对四轮毂电机驱动车辆的直接控制。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤一中所建立的轨迹跟踪变预瞄距离运动学模型,采用以下形式:

$$\begin{cases} \dot{y}_e = v_x \psi_e + v_x \beta - \omega v_x T_d \\ \dot{\psi}_e = v_x \rho - \omega \end{cases}$$

其中, \dot{y}_e 为侧向偏差变化率, $\dot{\psi}_e$ 为航向角偏差变化率, ψ_e 为航向角偏差, v_x 为纵向速度, T_d 为预瞄时间, β 为质心侧偏角, ω 为横摆角速度, ρ 为预瞄点处期望轨迹曲率;

所述三自由度动力学模型,包括纵向、侧向、横摆三个自由度,对车辆进行动力学分析,得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_y \omega - \frac{\rho C_d}{2m} A v_x^2 \\ -v_x \omega \\ 0 \end{bmatrix} + B_x \begin{bmatrix} F_{xfl} \\ F_{xfr} \\ F_{xrl} \\ F_{xrr} \end{bmatrix} + B_y \begin{bmatrix} F_{yfl} \\ F_{yfr} \\ F_{yrl} \\ F_{yrr} \end{bmatrix}$$

其中, m 为整车质量, I_z 为车辆横摆转动惯量, v_x 、 v_y 分别为车辆的纵向和侧向速度, \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 分别为车辆的纵向和侧向加速度, ω 为车辆的横摆角速度, $\dot{\omega}$ 为车辆的横摆角加速度, C_d 为空气阻力系数, A 为车身横截面积; F_{xij} 和 F_{yij} 分别是相应车轮所受的纵向力和侧向力,其中 $i \in \{f, r\}$, $j \in \{l, r\}$,分别代表前后、左右;

其中,系数矩阵 B_x 和 B_y 为:

$$B_x = \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{\cos \delta_r}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{\sin \delta_f}{m} & \frac{\sin \delta_r}{m} & 0 & 0 \\ \frac{l_f \sin \delta_f - d \cos \delta_f}{I_z} & \frac{l_f \sin \delta_f + d \cos \delta_f}{I_z} & -\frac{d}{I_z} & \frac{d}{I_z} \end{bmatrix}$$

$$B_y = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \delta_f}{m} & -\frac{\sin \delta_f}{m} & 0 & 0 \\ \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{l_f \cos \delta_f + d \sin \delta_f}{I_z} & \frac{l_f \cos \delta_f - d \sin \delta_f}{I_z} & -\frac{l_r}{I_z} & \frac{l_r}{I_z} \end{bmatrix}$$

其中, l_f 和 l_r 分别表示重心和前桥与后桥之间的距离, d 为轮距的一半; δ_f 和 δ_t 分别为前后轮转角。

3. 如权利要求2所述的方法, 其特征在于: 所述步骤二中对于横摆角速度以及质心侧偏角这两个状态量的参考值, 基于在所述三自由度动力学模型中去除纵向自由度得到的简化二自由度模型来计算, 具有以下关系:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{yf} + F_{yr} \\ I_z \dot{\omega} = \sum M_z = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + \bar{M}_z \end{cases}$$

其中, M_z 为横摆力矩, \bar{M}_z 为额外横摆力矩;

将轮胎力线性描述为:

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f \\ F_{yr} = C_r \alpha_r \end{cases}$$

其中, C_f 、 C_r 为前后轮侧偏刚度, α_f 、 α_r 为前后轮侧偏角, 则有如下关系:

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \frac{l_f \omega}{v_x} - \beta \\ \alpha_r = \frac{l_r \omega}{v_x} - \beta \end{cases};$$

由此, 各状态量及参考值具体为:

$$\begin{cases} y_{er} = 0 \\ \psi_{er} = 0 \\ \omega_r = \frac{1}{1 + H v_x^2} \cdot \frac{v_x}{l} \cdot \delta_f \\ \beta_r = \frac{1 - (\frac{m}{l})(\frac{l_f}{l_r C_r}) v_x^2}{1 + H v_x^2} \cdot \frac{l_r}{l} \cdot \delta_f \end{cases}$$

其中, $H = \frac{m}{l^2} \cdot \frac{l_f C_f - l_r C_r}{C_f C_r}$, y_e 为侧向偏差, ψ_e 为航向角偏差, l 为轴距, 状态量的下标r均表示参考值。

4. 如权利要求3所述的方法, 其特征在于: 所述步骤三中建立的模型预测控制器状态方程, 具有以下形式:

$$\begin{cases} \dot{y}_e = v_x \psi_e + v_x \beta - \omega v_x T_d \\ \dot{\psi}_e = v_x \rho - \omega \\ \dot{\beta} = \frac{-(C_r + C_f)}{mv_x} \beta + \left(\frac{l_f C_f - C_r l_r}{mv_x^2} - 1 \right) \omega + \frac{C_f}{mv_x} \delta_f \\ \dot{\omega} = \frac{(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z v_x} \beta + \frac{-(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} \omega + \frac{l_f C_f}{I_z} \delta_f + \frac{1}{I_z} \bar{M}_{z_des} \end{cases}$$

其中, $\dot{\beta}$ 为质心侧偏角变化率;

写成状态空间的形式, x 、 y 、 \dot{x} 分别为状态量、输出量、状态量变化率:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Dw \\ y = Cx \end{cases}$$

其中, 下标 des 表示期望值 $A = \begin{pmatrix} 0 & v_x & v_x & -v_x T_d \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{-(C_r + C_f)}{mv_x} & -\frac{(l_f C_f - C_r l_r)}{mv_x^2} - 1 \\ 0 & 0 & \frac{(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z v_x} & \frac{-(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} \end{pmatrix},$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{C_f}{mv_x} & 0 \\ \frac{l_f C_f}{I_z} & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{状态量 } x = [y_e, \psi_e, \beta, \omega]^T, \text{ 控制量}$$

$u = [\delta_f, \bar{M}_{z_des}]^T$, \bar{M}_{z_des} 为额外横摆力矩的期望值, 扰动量 $w = \rho$ 。

5. 如权利要求4所述的方法, 其特征在于: 所述步骤四中建立多目标优化函数具体包括以下步骤:

为获得预测输出方程, 先将状态空间方程离散化, 则有:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_{k,t} x(k) + B_{k,t} u(k) + D_{k,t} w(k) \\ y(k) = C_{k,t} x(k) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases}$$

其中, $A_{k,t} = e^{AT}$, $B_{k,t} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \cdot B$, $D_{k,t} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \cdot D$, $C_{k,t} = C$, T 为采样时间, e 为自然常

数;

为减小计算量, 提高模型预测控制器的计算效率, 做如下简化:

$$\begin{cases} A_{k,t} = A_{t,t}, k = 1, 2, \dots, t + N_p - 1 \\ B_{k,t} = B_{t,t}, k = 1, 2, \dots, t + N_p - 1 \end{cases}$$

其中, N_p 为预测时域, N_c 为控制时域;

则预测输出方程为:

$$Y(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}_u u(t-1) + \tilde{B}_{u_delta} \Delta U(t) + \tilde{D}W(t)$$

其中, $\tilde{A} = [A_{k,t} \dots A_{k,t}^{N_c} A_{k,t}^{N_c+1} \dots A_{k,t}^{N_p}]^T$,

$$\tilde{B}_u = [B_{k,t} \dots \sum_{i=0}^{N_c-1} A_{k,t}^i B_{k,t} \sum_{i=0}^{N_c} A_{k,t}^i B_{k,t} \dots \sum_{i=0}^{N_p-1} A_{k,t}^i B_{k,t}]^T,$$

$$\tilde{B}_{u_delta} = \begin{pmatrix} B_{k,t} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_c-1} A_{k,t}^i B_{k,t} & \dots & A_{k,t} B_{k,t} + B_{k,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} A_{k,t}^i B_{k,t} & \dots & \sum_{i=0}^{N_p-N_c} A_{k,t}^i B_{k,t} \end{pmatrix}, \quad \tilde{D} = \begin{pmatrix} D_{k,t} & 0 & \dots & 0 \\ A_{k,t} D_{k,t} & D_{k,t} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ A_{k,t}^{N_p-1} D_{k,t} & A_{k,t}^{N_p-2} D_{k,t} & \dots & D_{k,t} \end{pmatrix},$$

$Y(t) = [y(t+1|t)^T \dots y(t+N_p|t)^T]^T$, $\Delta U(t) = [\Delta u(t|t)^T \dots \Delta u(t+N_c-1|t)^T]^T$, $W(t) = [w(t|t)^T \dots w(t+N_p-1|t)^T]^T$;

根据预测输出量与期望输出量参考值设置目标函数:

$$\min_{\Delta U} J = \|Y(t) - Y_{ref}(t)\|_Q^2 + \|\Delta U(t)\|_R^2 + \sigma \varepsilon^2$$

其中, Y_{ref} 为期望输出量参考值, Q, R 为权重矩阵, σ 为权重系数, ε 为松弛因子;

利用二次规划算法对目标函数进行求解, 可得到最优控制增量序列 $\Delta U(t)$, 选取序列第一项与当前控制量的和作为下一步长的控制量;

对相关控制量的约束条件, 通过以下方式设置:

为满足机械限制, 需要对控制量的大小进行限制, 即对前轮转角与额外横摆力矩设置最大最小值:

$$\begin{aligned} \delta_{fmin} &\leq \delta_f \leq \delta_{fmax} \\ \bar{M}_{zmin} &\leq \bar{M}_z \leq \bar{M}_{zmax} \end{aligned}$$

其中, $\delta_{fmax}, \delta_{fmin}$ 分别表示前轮转角的最大和最小值, $\bar{M}_{zmax}, \bar{M}_{zmin}$ 分别表示额外横摆力矩的最大和最小值;

为了保持控制平顺性, 防止控制量发生突变, 对控制增量设置约束:

$$\begin{aligned} \Delta \delta_{fmin} &\leq \Delta \delta_f \leq \Delta \delta_{fmax} \\ \Delta \bar{M}_{zmin} &\leq \Delta \bar{M}_z \leq \Delta \bar{M}_{zmax} \end{aligned}$$

其中, $\Delta \delta_{fmax}, \Delta \delta_{fmin}$ 分别表示前轮转角增量的最大和最小值, $\Delta \bar{M}_{zmax}, \Delta \bar{M}_{zmin}$ 分别表示额外横摆力矩增量的最大和最小值;

考虑到操纵稳定性,对横摆角速度与质心侧偏角设置约束:

$$\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$$

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$$

其中, β_{\max} 、 β_{\min} 分别表示质心侧偏角的最大和最小值, ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别表示横摆角速度的最大和最小值;

通过求解带约束的多目标优化问题,实时获得最优控制序列,实现滚动优化。

6.如权利要求4所述的方法,其特征在于:步骤六中进行底层力矩分配基于以下关系:

$$\eta = \Lambda x$$

其中, $\eta = [T_{fl} \ T_{fr} \ T_{rl} \ T_{rr}]^T$, T_{fl} 、 T_{fr} 、 T_{rl} 、 T_{rr} 分别表示左右前轮和左右后轮, Λ 为系数矩阵,

$$\chi = [F_{x_des} \ \bar{M}_{z_des}]^T, \quad \Lambda = \frac{1}{R_c} \begin{bmatrix} \cos \delta_f & \cos \delta_f & 1 & 1 \\ -d \cos \delta_f + a \sin \delta_f & d \cos \delta_f + a \sin \delta_f & -d & d \end{bmatrix}$$

其中, F_{x_des} 为期望纵向驱动力, R_c 为车轮滚动半径;

设置目标函数:

$$\min_{\eta} I_1 = \|\eta - \Lambda \chi\|_S^2$$

其中, S 为权重矩阵;

F_{zij} 代表车轮所受的垂向载荷, μ_{ij} 为车轮处的路面附着系数,车轮所受来自地面的纵向力 F_{xij} 与施加在车轮上的转矩 T_{ij} 有如下关系:

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{1}{J_c} (T_{ij} - F_{xij} R_c - M_{fij})$$

其中, $\dot{\gamma}_{ij}$ 、 J_c 分别代表车轮转动角加速度和转动惯量, M_{fij} 为车轮受到的滚动阻力矩;车轮所受来自地面的侧向力 F_{yij} 可由简化的轮胎模型进行计算:

$$F_{yij} = -C_{ij} \sqrt{1 - \left(\frac{F_{xij}}{\mu_{ij} F_{zij}} \right)^2} \frac{\mu_{ij}}{k} \tan^{-1} \left(\frac{k}{\mu_{ij}} \alpha_{ij} \right)$$

其中, $k = \frac{C_{ij} \pi}{2 F_{zij}}$, α_{ij} 和为轮胎的侧偏角 C_{ij} 为轮胎侧偏刚度;

轮胎附着利用率可如下计算:

$$\Omega_{ij} = \frac{F_{xij}^2}{\mu_{ij}^2 F_{zij}^2}$$

各轮胎附着利用率之和最小则车辆的操纵稳定性越好,而四个车轮的附着条件并非完全相同,为考虑四个车轮对操纵稳定性的影响,设置目标函数:

$$\min_{\eta} I_2 = \|\Theta \eta\|_W^2$$

其中, W 为权重矩阵, $\Theta = \text{diag} \left(\frac{\xi_{ij}}{\mu_{ij} F_{zij} R_c} \right)$, $\xi_{ij} = \frac{\Omega_{ij}}{\sum \Omega_{ij}}$;

则总目标函数为:

$$\min_{\eta} I = I_1 + I_2 = \|\eta - \Lambda\chi\|_s^2 + \|\Theta\eta\|_w^2$$

根据路面附着条件设置摩擦椭圆约束：

$$F_{xij}^2 + F_{yij}^2 \leq (\mu_{ij} F_{zij})^2$$

根据机械约束，对四轮毂电机转矩设置约束：

$$\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$$

其中， η 、 η_{\max} 、 η_{\min} 分别为四轮毂电机转矩及其最大最小值；

求解带约束的优化函数即得到四轮毂电机转矩最优控制序列。

一种四轮毂电机驱动车辆的综合控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及分布式驱动车辆控制领域,具体涉及一种四轮毂电机驱动车辆的综合控制方法,用于实现操纵稳定性与轨迹跟踪的纵横向综合控制。

背景技术

[0002] 四轮毂电机驱动车辆四个驱动轮的驱动/制动转矩可以独立控制,其驱动冗余相对于现有技术更有利于实现转向过程中的操纵稳定性控制。目前对于轮毂电机驱动车辆的稳定性控制多采用模型预测控制的方式,其可以考虑非线性动力学模型并预测未来一段时间内系统的输出,通过滚动解决带约束的多目标最优问题使得系统在满足多目标跟踪精度的同时满足约束条件。然而,现有的轨迹跟踪模型预测控制还主要存在以下几个问题:

[0003] 1、大部分轨迹跟踪控制并未考虑底层力矩分配算法,将底层视为理想转向模型,未考虑具体执行器,这与实车路径跟踪情况不符;2、大部分轨迹跟踪控制未对横摆角速度、质心侧偏角设置参考值并进行控制,仅对动力学参数进行约束,并未实现对横摆角速度、质心侧偏角的准确控制;3、大部分轨迹跟踪模型预测控制采用补偿模型或者固定预瞄距离的单点预瞄模型建立车辆一道路误差模型。在车速期望轨迹曲率变化的工况下,控制效果有所降低,且与驾驶员预瞄机制不符,不符合实际驾驶员操纵行为;4、车辆的路径跟踪控制由纵向控制与横向控制共同决定,纵向速度作为横向控制算法中的状态参数对控制效果有一定影响,大部分方法未考虑速度变化下的轨迹跟踪效果,或将横向与纵向解耦控制,降低算法精度使得控制偏差较大。

发明内容

[0004] 为克服上述现有技术中所存在的技术问题,本发明提供了一种四轮毂电机驱动车辆的综合控制方法,具体包括以下步骤:

[0005] 步骤一、针对四轮毂电机驱动车辆,建立轨迹跟踪变预瞄距离运动学模型与三自由度动力学模型;

[0006] 步骤二、确定待跟踪的期望轨迹上的状态量:航向角偏差,侧向偏差,质心侧偏角以及横摆角速度,并设置所述各状态量的参考值;

[0007] 步骤三、确定由步骤一中所建立的两个模型共同组成的四轮毂驱动电机驱动车辆的模型预测控制器状态方程;

[0008] 步骤四、基于步骤三中所建立的状态方程确定预测输出方程,根据预测输出量与期望输出量参考值建立多目标优化函数,设置满足机械限制、控制平顺性、操纵稳定性的相关控制量约束条件,实时滚动优化获得前轮转角与额外横摆力矩的最优控制量;

[0009] 步骤五、根据实际纵向车速 v_x 与纵向车速参考值 v_{x_r} 的偏差,用PID控制方法得到期望车辆总纵向驱动力 F_{x-des} ,满足车辆对纵向车速参考值的跟踪;

[0010] 步骤六、进行底层力矩分配,根据期望纵向驱动力以及期望额外横摆力矩得到期望四轮转矩,将指令分配到四个电机控制器,实现对四轮毂电机驱动车辆的直接控制。

[0011] 进一步地,所述步骤一中所建立的轨迹跟踪变预瞄距离运动学模型,采用以下形式:

$$[0012] \quad \begin{cases} \dot{y}_e = v_x \psi_e + v_x \beta - \omega v_x T_d \\ \dot{\psi}_e = v_x \rho - \omega \end{cases}$$

[0013] 其中, \dot{y}_e 为侧向偏差变化率, $\dot{\psi}_e$ 为航向角偏差变化率, ψ_e 为航向角偏差, v_x 为纵向速度, T_d 为预瞄时间, β 为质心侧偏角, ω 为横摆角速度, ρ 为预瞄点处期望轨迹曲率, 预瞄距离随车速变化, 能够提高跟踪精度与鲁棒性;

[0014] 所述三自由度动力学模型, 包括纵向、侧向、横摆三个自由度, 对车辆进行动力学分析, 可以得到以下方程:

$$[0015] \quad \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_y \omega - \frac{\rho C_d}{2m} A v_x^2 \\ -v_x \omega \\ 0 \end{bmatrix} + B_x \begin{bmatrix} F_{xfl} \\ F_{xfr} \\ F_{xrl} \\ F_{xrr} \end{bmatrix} + B_y \begin{bmatrix} F_{yfl} \\ F_{yfr} \\ F_{yrl} \\ F_{yrr} \end{bmatrix}$$

[0016] 其中, m 为整车质量, I_z 为车辆横摆转动惯量, v_x 、 v_y 分别为车辆的纵向和侧向速度, \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 分别为车辆的纵向和侧向加速度, ω 为车辆的横摆角速度, $\dot{\omega}$ 为车辆的横摆角加速度, C_d 为空气阻力系数, A 为车身横截面积; F_{xij} 和 F_{yij} 分别是相应车轮所受的纵向力和侧向力, 其中 $i \in \{f, r\}$, $j \in \{l, r\}$, 分别代表前后、左右;

[0017] 其中, 系数矩阵 B_x 和 B_y 为:

$$[0018] \quad B_x = \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{\cos \delta_r}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{\sin \delta_f}{m} & \frac{\sin \delta_r}{m} & 0 & 0 \\ \frac{l_f \sin \delta_f - d \cos \delta_f}{I_z} & \frac{l_f \sin \delta_f + d \cos \delta_f}{I_z} & -\frac{d}{I_z} & \frac{d}{I_z} \end{bmatrix}$$

$$[0019] \quad B_y = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \delta_f}{m} & -\frac{\sin \delta_r}{m} & 0 & 0 \\ \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{\cos \delta_r}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{l_f \cos \delta_f + d \sin \delta_f}{I_z} & \frac{l_f \cos \delta_f - d \sin \delta_f}{I_z} & -\frac{l_r}{I_z} & \frac{l_r}{I_z} \end{bmatrix}$$

[0020] 其中, l_f 和 l_r 分别表示重心和前桥与后桥之间的距离, d 为轮距的一半; δ_f 和 δ_r 分别为前后轮转角。

[0021] 进一步地, 所述步骤二中对于横摆角速度以及质心侧偏角这两个状态量的参考值, 基于在所述三自由度动力学模型中去除纵向自由度得到的简化二自由度模型来计算, 具有以下关系:

$$[0022] \quad \begin{cases} m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{yf} + F_{yr} \\ I_z \dot{\omega} = \sum M_z = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + \bar{M}_z \end{cases}$$

[0023] 其中, M_z 为横摆力矩, \bar{M}_z 为额外横摆力矩;

[0024] 将轮胎力线性描述为:

$$[0025] \quad \begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f \\ F_{yr} = C_r \alpha_r \end{cases}$$

[0026] 其中, C_f 、 C_r 为前后轮侧偏刚度, α_f 、 α_r 为前后轮侧偏角, 则有如下关系:

$$[0027] \quad \begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \frac{l_f \omega}{v_x} - \beta \\ \alpha_r = \frac{l_r \omega}{v_x} - \beta \end{cases};$$

[0028] 由此, 各状态量及参考值具体为:

$$[0029] \quad \begin{cases} y_{er} = 0 \\ \psi_{er} = 0 \\ \omega_r = \frac{1}{1 + H v_x^2} \cdot \frac{v_x}{l} \cdot \delta_f \\ \beta_r = \frac{1 - (\frac{m}{l})(\frac{l_f}{l_r C_r}) v_x^2}{1 + H v_x^2} \cdot \frac{l_r}{l} \cdot \delta_f \end{cases}$$

[0030] 其中, $H = \frac{m}{l^2} \cdot \frac{l_f C_f - l_r C_r}{C_f C_r}$, y_e 为侧向偏差, ψ_e 为航向角偏差, l 为轴长, 状态量的下标

r 均表示参考值。

[0031] 进一步地, 所述步骤三中建立的模型预测控制器状态方程, 具有以下形式:

[0032] 其中, $\dot{\beta}$ 为质心侧偏角变化率;

[0033] 写成状态空间的形式, x 、 y 、 \dot{x} 分别为状态量、输出量、状态量变化率:

$$[0034] \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Dw \\ y = Cx \end{cases}$$

$$[0035] \quad \text{其中, 下标 } des \text{ 表示期望值 } A = \begin{pmatrix} 0 & v_x & v_x & -v_x T_d \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{-(C_r + C_f)}{m v_x} & -\frac{(l_f C_f - C_r l_r)}{m v_x^2} - 1 \\ 0 & 0 & \frac{(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z v_x} & -\frac{(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} \end{pmatrix},$$

$$[0036] \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{C_f}{mv_x} & 0 \\ \frac{l_f C_f}{I_z} & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{状态量 } x = [y_e, \psi_e, \beta, \omega]^T, \text{ 控制}$$

量 $u = [\delta_f, \bar{M}_{z_des}]^T$, \bar{M}_{z_des} 为额外横摆力矩的期望值, 扰动量 $w = \rho$ 。

[0037] 进一步地, 所述步骤四中建立多目标优化函数具体包括以下步骤:

[0038] 为获得预测输出方程, 先将状态空间方程离散化, 则有:

$$[0039] \quad \begin{cases} x(k+1) = A_{k,t} x(k) + B_{k,t} u(k) + D_{k,t} w(k) \\ y(k) = C_{k,t} x(k) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases}$$

[0040] 其中, $A_{k,t} = e^{AT}$, $B_{k,t} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \cdot B$, $D_{k,t} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \cdot D$, $C_{k,t} = C$, T 为采样时间, e 为自然常数;

然常数;

[0041] 为减小计算量, 提高模型预测控制器的计算效率, 做如下简化:

$$[0042] \quad \begin{cases} A_{k,t} = A_{t,t}, k = 1, 2, \dots, t + N_p - 1 \\ B_{k,t} = B_{t,t}, k = 1, 2, \dots, t + N_p - 1 \end{cases}$$

[0043] 其中, N_p 为预测时域, N_c 为控制时域;

[0044] 则预测输出方程为:

$$[0045] \quad Y(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}_u u(t-1) + \tilde{B}_{u_delta} \Delta U(t) + \tilde{D}W(t)$$

[0046] 其中, $\tilde{A} = [A_{k,t} \dots A_{k,t}^{N_c} A_{k,t}^{N_c+1} \dots A_{k,t}^{N_p}]^T$,

$$[0047] \quad \tilde{B}_u = [B_{k,t} \dots \sum_{i=0}^{N_c-1} A_{k,t}^i B_{k,t} \quad \sum_{i=0}^{N_c} A_{k,t}^i B_{k,t} \quad \dots \quad \sum_{i=0}^{N_p-1} A_{k,t}^i B_{k,t}]^T,$$

$$[0048] \quad \tilde{B}_{u_delta} = \begin{pmatrix} B_{k,t} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_c-1} A_{k,t}^i B_{k,t} & \dots & A_{k,t} B_{k,t} + B_{k,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} A_{k,t}^i B_{k,t} & \dots & \sum_{i=0}^{N_p-N_c} A_{k,t}^i B_{k,t} \end{pmatrix},$$

$$[0049] \quad \tilde{D} = \begin{pmatrix} D_{k,t} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{k,t} D_{k,t} & D_{k,t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ A_{k,t}^{N_p-1} D_{k,t} & A_{k,t}^{N_p-2} D_{k,t} & \cdots & D_{k,t} \end{pmatrix},$$

$$[0050] \quad Y(t) = [y(t+1|t) \cdots y(t+N_p|t)]^T, \Delta U(t) = [\Delta u(t|t) \cdots \Delta u(t+N_c-1|t)]^T,$$

$$[0051] \quad W(t) = [w(t|t) \cdots w(t+N_p-1|t)]^T;$$

[0052] 根据预测输出量与期望输出量参考值设置目标函数:

$$[0053] \quad \min_{\Delta U} J = \|Y(t) - Y_{ref}(t)\|_Q^2 + \|\Delta U(t)\|_R^2 + \sigma \varepsilon^2$$

[0054] 其中, Y_{ref} 为期望输出量参考值, Q, R 为权重矩阵, σ 为权重系数, ε 为松弛因子;

[0055] 利用二次规划算法对目标函数进行求解, 可得到最优控制增量序列 $\Delta U(t)$, 选取序列第一项与当前控制量的和作为下一步长的控制量;

[0056] 对相关控制量的约束条件, 通过以下方式设置:

[0057] 为满足机械限制, 需要对控制量的大小进行限制, 即对前轮转角与额外横摆力矩设置最大最小值:

$$[0058] \quad \delta_{f_{\min}} \leq \delta_f \leq \delta_{f_{\max}}$$

$$[0059] \quad \bar{M}_{z_{\min}} \leq \bar{M}_z \leq \bar{M}_{z_{\max}}$$

[0060] 其中, $\delta_{f_{\max}}, \delta_{f_{\min}}$ 分别表示前轮转角的最大和最小值, $\bar{M}_{z_{\max}}, \bar{M}_{z_{\min}}$ 分别表示额外横摆力矩的最大和最小值;

[0061] 为了保持控制平顺性, 防止控制量发生突变, 对控制增量设置约束:

$$[0062] \quad \Delta \delta_{f_{\min}} \leq \Delta \delta_f \leq \Delta \delta_{f_{\max}}$$

$$[0063] \quad \Delta \bar{M}_{z_{\min}} \leq \Delta \bar{M}_z \leq \Delta \bar{M}_{z_{\max}}$$

[0064] 其中, $\Delta \delta_{f_{\max}}, \Delta \delta_{f_{\min}}$ 分别表示前轮转角增量的最大和最小值, $\Delta \bar{M}_{z_{\max}}, \Delta \bar{M}_{z_{\min}}$ 分别表示额外横摆力矩增量的最大和最小值;

[0065] 考虑到操纵稳定性, 对横摆角速度与质心侧偏角设置约束:

$$[0066] \quad \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$$

$$[0067] \quad \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$$

[0068] 其中, $\beta_{\max}, \beta_{\min}$ 分别表示质心侧偏角的最大和最小值, $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别表示横摆角速度的最大和最小值;

[0069] 通过求解带约束的多目标优化问题, 实时获得最优控制序列, 实现滚动优化。

[0070] 进一步地, 步骤六中进行底层力矩分配基于以下关系:

$$[0071] \quad \eta = \Lambda x$$

[0072] 其中, $\eta = [T_{fl} \ T_{fr} \ T_{rl} \ T_{rr}]^T$, $T_{fl}, T_{fr}, T_{rl}, T_{rr}$ 分别表示左右前轮和左右后轮, Λ 为系数矩阵,

$$[0073] \quad \chi = [F_{x_des} \ \bar{M}_{z_des}]^T, \quad \Lambda = \frac{1}{R_c} \begin{bmatrix} \cos \delta_f & \cos \delta_f & 1 & 1 \\ -d \cos \delta_f + a \sin \delta_f & d \cos \delta_f + a \sin \delta_f & -d & d \end{bmatrix}$$

[0074] 其中, F_{x_des} 为期望纵向驱动力, R_c 为车轮滚动半径;

[0075] 设置目标函数:

$$[0076] \quad \min_{\eta} I_1 = \|\eta - \Lambda \chi\|_S^2$$

[0077] 其中, S 为权重矩阵;

[0078] $F_{z_{ij}}$ 代表车轮所受的垂向载荷, μ_{ij} 为车轮处的路面附着系数, 车轮所受来自地面的纵向力 $F_{x_{ij}}$ 与施加在车轮上的转矩 T_{ij} 有如下关系:

$$[0079] \quad \dot{\gamma}_{ij} = \frac{1}{J_c} (T_{ij} - F_{x_{ij}} R_c - M_{f_{ij}})$$

[0080] 其中, $\dot{\gamma}_{ij}$ 、 J_c 分别代表车轮转动角加速度、转动惯量, $M_{f_{ij}}$ 为车轮受到的滚动阻力矩; 车轮所受来自地面的侧向力 $F_{y_{ij}}$ 可由简化的轮胎模型进行计算:

$$[0081] \quad F_{y_{ij}} = -C_{ij} \sqrt{1 - \left(\frac{F_{x_{ij}}}{\mu_{ij} F_{z_{ij}}} \right)^2} \frac{\mu_{ij}}{k} \tan^{-1} \left(\frac{k}{\mu_{ij}} \alpha_{ij} \right)$$

[0082] 其中, $k = \frac{C_{ij} \pi}{2F_{z_{ij}}}$, α_{ij} 为轮胎的侧偏角, C_{ij} 为轮胎侧偏刚度;

[0083] 轮胎附着利用率可如下计算:

$$[0084] \quad \Omega_{ij} = \frac{F_{x_{ij}}^2}{\mu_{ij}^2 F_{z_{ij}}^2}$$

[0085] 各轮胎附着利用率之和最小则车辆的操纵稳定性越好, 而四个车轮的附着条件并非完全相同, 为考虑四个车轮对操纵稳定性的影响, 设置目标函数:

$$[0086] \quad \min_{\eta} I_2 = \|\Theta \eta\|_W^2$$

[0087] 其中, W 为权重矩阵, $\Theta = \text{diag} \left(\frac{\xi_{ij}}{\mu_{ij} F_{z_{ij}} R_c} \right)$, $\xi_{ij} = \frac{\Omega_{ij}}{\sum \Omega_{ij}}$;

[0088] 则总目标函数为:

$$[0089] \quad \min_{\eta} I = I_1 + I_2 = \|\eta - \Lambda \chi\|_S^2 + \|\Theta \eta\|_W^2$$

[0090] 根据路面附着条件设置摩擦椭圆约束:

$$[0091] \quad F_{x_{ij}}^2 + F_{y_{ij}}^2 \leq (\mu_{ij} F_{z_{ij}})^2$$

[0092] 根据机械约束, 对四轮电机转矩设置约束:

$$[0093] \quad \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$$

[0094] 其中, η 、 η_{\max} 、 η_{\min} 分别为四轮电机转矩及其最大最小值;

[0095] 求解带约束的优化函数即得到四轮电机转矩最优控制序列。

[0096] 上述本发明所提供的方法, 相对于现有技术至少具有以下有益效果:

[0097] (1). 本发明结合了变预瞄距离运动学模型获取当前状态与期望轨迹的航向角偏差与侧向位移偏差, 建立模型预测控制器状态方程, 使被控车辆的运动状态更符合实际驾驶员操纵特性, 提高轨迹跟踪的鲁棒性;

[0098] (2). 在转向过程中, 根据车辆动力学模型设定了横摆角速度与质心侧偏角参考值, 实现对横摆角速度以及质心侧偏角的控制, 在对期望轨迹位置点跟踪的同时保证了转向可控性, 实现了操纵稳定性与轨迹跟踪的综合控制。

[0099] (3). 得到期望纵向力与期望额外横摆力矩, 进而通过转矩分配算法得到四轮电机转矩最优控制序列。考虑底层力矩分配算法, 对分布式驱动车辆轨迹跟踪与操纵稳定性相关执行器进行控制, 提高了控制的准确性与鲁棒性, 并实现了纵横向耦合控制。

附图说明

[0100] 图1为本发明所提供方法的执行过程框图;

[0101] 图2为本发明所提供方法中的变预瞄距离运动学模型示意图;

[0102] 图3为四轮电机驱动车辆三自由度动力学模型示意图;

[0103] 图4为四轮电机驱动车辆二自由度动力学模型示意图。

具体实施方式

[0104] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例是本发明一部分实施例, 而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例, 本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例, 都属于本发明保护的范围。

[0105] 本发明所提供的一种四轮电机驱动车辆的综合控制方法, 如图1所示, 具体包括以下步骤:

[0106] 步骤一、针对四轮电机驱动车辆, 建立轨迹跟踪变预瞄距离运动学模型与三自由度动力学模型;

[0107] 步骤二、确定待跟踪的期望轨迹上的状态量: 航向角偏差, 侧向偏差, 质心侧偏角以及横摆角速度, 并设置所述各状态量的参考值;

[0108] 步骤三、确定由步骤一中所建立的两个模型共同组成的四轮电机驱动车辆的模型预测控制器状态方程;

[0109] 步骤四、基于步骤三中所建立的状态方程确定预测输出方程, 根据预测输出量与期望输出量参考值建立多目标优化函数, 设置满足机械限制、控制平顺性、操纵稳定性的相关控制量约束条件, 实时滚动优化获得前轮转角与额外横摆力矩的最优控制量;

[0110] 步骤五、根据实际纵向车速 v_x 与纵向车速参考值 v_{xT} 的偏差, 用PID控制方法得到期望车辆总纵向驱动力 F_{x-des} , 满足车辆对纵向车速参考值的跟踪;

[0111] 步骤六、进行底层力矩分配, 根据期望纵向驱动力以及期望额外横摆力矩得到期望四轮转矩, 将指令分配到四个电机控制器, 实现对四轮电机驱动车辆的直接控制。

[0112] 在本发明的一个优选实施方式中, 所述步骤一中所建立的轨迹跟踪变预瞄距离运动学模型, 如图2所示, 可采用以下形式:

$$[0113] \quad \begin{cases} \dot{y}_e = v_x \psi_e + v_x \beta - \omega v_x T_d \\ \dot{\psi}_e = v_x \rho - \omega \end{cases}$$

[0114] 其中, \dot{y}_e 为侧向偏差变化率, $\dot{\psi}_e$ 为航向角偏差变化率, ψ_e 为航向角偏差, v_x 为纵向速度, T_d 为预瞄时间, β 为质心侧偏角, ω 为横摆角速度, ρ 为预瞄点处期望轨迹曲率, 预瞄距

离随车速变化,能够提高跟踪精度与鲁棒性;

[0115] 所述三自由度动力学模型,如图3所示,包括纵向、侧向、横摆三个自由度,对车辆进行动力学分析,可以得到以下方程:

$$[0116] \quad \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_y \omega - \frac{\rho C_d}{2m} A v_x^2 \\ -v_x \omega \\ 0 \end{bmatrix} + B_x \begin{bmatrix} F_{xfl} \\ F_{xfr} \\ F_{xrl} \\ F_{xrr} \end{bmatrix} + B_y \begin{bmatrix} F_{yfl} \\ F_{yfr} \\ F_{yrl} \\ F_{yrr} \end{bmatrix}$$

[0117] 其中, m 为整车质量, I_z 为车辆横摆转动惯量, v_x 、 v_y 分别为车辆的纵向和侧向速度, \dot{v}_x 、 \dot{v}_y 分别为车辆的纵向和侧向加速度, ω 为车辆的横摆角速度, $\dot{\omega}$ 为车辆的横摆角加速度, C_d 为空气阻力系数, A 为车身横截面积; F_{xij} 和 F_{yij} 分别是相应车轮所受的纵向力和侧向力,其中 $i \in \{f, r\}$, $j \in \{l, r\}$,分别代表前后、左右;

[0118] 其中,系数矩阵 B_x 和 B_y 为:

$$[0119] \quad B_x = \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{\cos \delta_r}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{\sin \delta_f}{m} & \frac{\sin \delta_r}{m} & 0 & 0 \\ \frac{l_f \sin \delta_f - d \cos \delta_f}{I_z} & \frac{l_r \sin \delta_r + d \cos \delta_r}{I_z} & -\frac{d}{I_z} & \frac{d}{I_z} \end{bmatrix}$$

$$[0120] \quad B_y = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \delta_f}{m} & -\frac{\sin \delta_r}{m} & 0 & 0 \\ \frac{\cos \delta_f}{m} & \frac{\cos \delta_r}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{l_f \cos \delta_f + d \sin \delta_f}{I_z} & \frac{l_r \cos \delta_r - d \sin \delta_r}{I_z} & -\frac{l_f}{I_z} & \frac{l_r}{I_z} \end{bmatrix}$$

[0121] 其中, l_f 和 l_r 分别表示重心和前桥与后桥之间的距离, d 为轮距的一半; δ_f 和 δ_r 分别为前后轮转角。

[0122] 在本发明的一个优选实施方式中,所述步骤二中对于横摆角速度以及质心侧偏角这两个状态量的参考值,基于在所述三自由度动力学模型中去除纵向自由度得到的如图4所示的简化二自由度模型来计算,具有以下关系:

$$[0123] \quad \begin{cases} m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{yf} + F_{yr} \\ I_z \dot{\omega} = \sum M_z = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + \bar{M}_z \end{cases}$$

[0124] 其中, M_z 为横摆力矩, \bar{M}_z 为额外横摆力矩;

[0125] 将轮胎力线性描述为:

$$[0126] \quad \begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f \\ F_{yr} = C_r \alpha_r \end{cases}$$

[0127] 其中, C_f 、 C_r 为前后轮侧偏刚度, α_f 、 α_r 为前后轮侧偏角,则有如下关系:

$$[0128] \quad \begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \frac{l_f \omega}{v_x} - \beta \\ \alpha_r = \frac{l_r \omega}{v_x} - \beta \end{cases};$$

[0129] 由此,各状态量及参考值具体为:

$$[0130] \quad \begin{cases} y_{er} = 0 \\ \psi_{er} = 0 \\ \omega_r = \frac{1}{1 + H v_x^2} \cdot \frac{v_x}{l} \cdot \delta_f \\ \beta_r = \frac{1 - (\frac{m}{l})(\frac{l_f}{l_r} C_r) v_x^2}{1 + H v_x^2} \cdot \frac{l_r}{l} \cdot \delta_f \end{cases}$$

[0131] 其中, $H = \frac{m}{l^2} \cdot \frac{l_f C_f - l_r C_r}{C_f C_r}$, y_e 为侧向偏差, ψ_e 为航向角偏差, l 为轴长, 状态量的下标 r 均表示参考值。

[0132] 在本发明的一个优选实施方式中,所述步骤三中建立的模型预测控制器状态方程,具有以下形式:

$$[0133] \quad \begin{cases} \dot{y}_e = v_x \psi_e + v_x \beta - \omega v_x T_d \\ \dot{\psi}_e = v_x \rho - \omega \\ \dot{\beta} = \frac{-(C_r + C_f)}{m v_x} \beta + \left(\frac{l_f C_f - C_r l_r}{m v_x^2} - 1 \right) \omega + \frac{C_f}{m v_x} \delta_f \\ \dot{\omega} = \frac{(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z v_x} \beta + \frac{-(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} r + \frac{l_f C_f}{I_z} \delta_f + \frac{1}{I_z} \bar{M}_{z_des} \end{cases}$$

[0134] 其中, $\dot{\beta}$ 为质心侧偏角变化率;

[0135] 写成状态空间的形式, x 、 y 、 \dot{x} 分别为状态量、输出量、状态量变化率:

$$[0136] \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Dw \\ y = Cx \end{cases}$$

$$[0137] \quad \text{其中, 下标 des 表示期望值 } A = \begin{pmatrix} 0 & v_x & v_x & -v_x T_d \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{-(C_r + C_f)}{m v_x} & -\frac{(l_f C_f - C_r l_r)}{m v_x^2} - 1 \\ 0 & 0 & \frac{(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z v_x} & -\frac{(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} \end{pmatrix},$$

$$[0138] \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{C_f}{mv_x} & 0 \\ \frac{l_f C_f}{I_z} & \frac{1}{I_z} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{状态量 } x = [y_e, \psi_e, \beta, \omega]^T, \text{ 控制}$$

量 $u = [\delta_f, \bar{M}_{z_des}]^T$, \bar{M}_{z_des} 为额外横摆力矩的期望值, 扰动量 $w = \rho$ 。

[0139] 在本发明的一个优选实施方式中, 所述步骤四中建立多目标优化函数具体包括以下步骤:

[0140] 为获得预测输出方程, 先将状态空间方程离散化, 则有:

$$[0141] \quad \begin{cases} x(k+1) = A_{k,t} x(k) + B_{k,t} u(k) + D_{k,t} w(k) \\ y(k) = C_{k,t} x(k) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases}$$

[0142] 其中, $A_{k,t} = e^{AT}$, $B_{k,t} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \cdot B$, $D_{k,t} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \cdot D$, $C_{k,t} = C$, T 为采样时间, e 为自然常数;

然常数;

[0143] 为减小计算量, 提高模型预测控制器的计算效率, 做如下简化:

$$[0144] \quad \begin{cases} A_{k,t} = A_{t,t}, k = 1, 2, \dots, t + N_p - 1 \\ B_{k,t} = B_{t,t}, k = 1, 2, \dots, t + N_p - 1 \end{cases}$$

[0145] 其中, N_p 为预测时域, N_c 为控制时域;

[0146] 则预测输出方程为:

$$[0147] \quad Y(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}_u u(t-1) + \tilde{B}_{u_delta} \Delta U(t) + \tilde{D}W(t)$$

[0148] 其中, $\tilde{A} = [A_{k,t} \cdots A_{k,t}^{N_c} A_{k,t}^{N_c+1} \cdots A_{k,t}^{N_p}]^T$,

$$[0149] \quad \tilde{B}_u = [B_{k,t} \cdots \sum_{i=0}^{N_c-1} A_{k,t}^i B_{k,t} \sum_{i=0}^{N_c} A_{k,t}^i B_{k,t} \cdots \sum_{i=0}^{N_p-1} A_{k,t}^i B_{k,t}]^T,$$

$$[0150] \quad \tilde{B}_{u_delta} = \begin{pmatrix} B_{k,t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_c-1} A_{k,t}^i B_{k,t} & \cdots & A_{k,t} B_{k,t} + B_{k,t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} A_{k,t}^i B_{k,t} & \cdots & \sum_{i=0}^{N_p-N_c} A_{k,t}^i B_{k,t} \end{pmatrix},$$

$$[0151] \quad \tilde{D} = \begin{pmatrix} D_{k,t} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{k,t} D_{k,t} & D_{k,t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ A_{k,t}^{N_p-1} D_{k,t} & A_{k,t}^{N_p-2} D_{k,t} & \cdots & D_{k,t} \end{pmatrix},$$

$$[0152] \quad Y(t) = [y(t+1|t) \cdots y(t+N_p|t)]^T, \Delta U(t) = [\Delta u(t|t) \cdots \Delta u(t+N_c-1|t)]^T,$$

$$[0153] \quad W(t) = [w(t|t) \cdots w(t+N_p-1|t)]^T;$$

[0154] 根据预测输出量与期望输出量参考值设置目标函数:

$$[0155] \quad \min_{\Delta U} J = \|Y(t) - Y_{ref}(t)\|_Q^2 + \|\Delta U(t)\|_R^2 + \sigma \varepsilon^2$$

[0156] 其中, Y_{ref} 为期望输出量参考值, Q, R 为权重矩阵, σ 为权重系数, ε 为松弛因子;

[0157] 利用二次规划算法对目标函数进行求解, 可得到最优控制增量序列 $\Delta U(t)$, 选取序列第一项与当前控制量的和作为下一步长的控制量;

[0158] 对相关控制量约束条件, 通过以下方式设置:

[0159] 为满足机械限制, 需要对控制量的大小进行限制, 即对前轮转角与额外横摆力矩设置最大最小值:

$$[0160] \quad \delta_{fmin} \leq \delta_f \leq \delta_{fmax}$$

$$[0161] \quad \bar{M}_{zmin} \leq \bar{M}_z \leq \bar{M}_{zmax}$$

[0162] 其中, $\delta_{fmax}, \delta_{fmin}$ 分别表示前轮转角的最大和最小值, $\bar{M}_{zmax}, \bar{M}_{zmin}$ 分别表示额外横摆力矩的最大和最小值;

[0163] 为了保持控制平顺性, 防止控制量发生突变, 对控制增量设置约束:

$$[0164] \quad \Delta \delta_{fmin} \leq \Delta \delta_f \leq \Delta \delta_{fmax}$$

$$[0165] \quad \Delta \bar{M}_{zmin} \leq \Delta \bar{M}_z \leq \Delta \bar{M}_{zmax}$$

[0166] 其中, $\Delta \delta_{fmax}, \Delta \delta_{fmin}$ 分别表示前轮转角增量的最大和最小值, $\Delta \bar{M}_{zmax}, \Delta \bar{M}_{zmin}$ 分别表示额外横摆力矩增量的最大和最小值;

[0167] 考虑到操纵稳定性, 对横摆角速度与质心侧偏角设置约束:

$$[0168] \quad \beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max}$$

$$[0169] \quad \omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max}$$

[0170] 其中, β_{max}, β_{min} 分别表示质心侧偏角的最大和最小值, $\omega_{max}, \omega_{min}$ 分别表示横摆角速度的最大和最小值;

[0171] 通过求解带约束的多目标优化问题, 实时获得最优控制序列, 实现滚动优化。

[0172] 在本发明的一个优选实施方式中, 步骤六中进行底层力矩分配基于以下关系:

$$[0173] \quad \eta = \Lambda x$$

[0174] 其中, $\eta = [T_{fl} \ T_{fr} \ T_{rl} \ T_{rr}]^T$, $T_{fl}, T_{fr}, T_{rl}, T_{rr}$ 分别表示左右前轮和左右后轮, Λ 为系数矩阵,

$$[0175] \quad \chi = [F_{x_des} \ \bar{M}_{z_des}]^T, \quad \Lambda = \frac{1}{R_c} \begin{bmatrix} \cos \delta_f & \cos \delta_f & 1 & 1 \\ -d \cos \delta_f + a \sin \delta_f & d \cos \delta_f + a \sin \delta_f & -d & d \end{bmatrix}$$

[0176] 其中, F_{x_des} 为期望纵向驱动力, R_c 为车轮滚动半径;

[0177] 设置目标函数:

$$[0178] \quad \min_{\eta} I_1 = \|\eta - \Lambda \chi\|_S^2$$

[0179] 其中, S 为权重矩阵;

[0180] $F_{z_{ij}}$ 代表车轮所受的垂向载荷, μ_{ij} 为车轮处的路面附着系数, 车轮所受来自地面的纵向力 $F_{x_{ij}}$ 与施加在车轮上的转矩 T_{ij} 有如下关系:

$$[0181] \quad \dot{\gamma}_{ij} = \frac{1}{J_c} (T_{ij} - F_{x_{ij}} R_c - M_{f_{ij}})$$

[0182] 其中, $\dot{\gamma}_{ij}$ 、 J_c 分别代表车轮转动角加速度和转动惯量, $M_{f_{ij}}$ 为车轮受到的滚动阻力矩; 车轮所受来自地面的侧向力 $F_{y_{ij}}$ 可由简化的轮胎模型进行计算:

$$[0183] \quad F_{y_{ij}} = -C_{ij} \sqrt{1 - \left(\frac{F_{x_{ij}}}{\mu_{ij} F_{z_{ij}}} \right)^2} \frac{\mu_{ij}}{k} \tan^{-1} \left(\frac{k}{\mu_{ij}} \alpha_{ij} \right)$$

[0184] 其中, $k = \frac{C_{ij} \pi}{2F_{z_{ij}}}$, α_{ij} 为轮胎的侧偏角, C_{ij} 为轮胎侧偏刚度;

[0185] 轮胎附着利用率可如下计算:

$$[0186] \quad \Omega_{ij} = \frac{F_{x_{ij}}^2}{\mu_{ij}^2 F_{z_{ij}}^2}$$

[0187] 各轮胎附着利用率之和最小则车辆的操纵稳定性越好, 而四个车轮的附着条件并非完全相同, 为考虑四个车轮对操纵稳定性的影响, 设置目标函数:

$$[0188] \quad \min_{\eta} I_2 = \|\Theta \eta\|_W^2$$

[0189] 其中, W 为权重矩阵, $\Theta = \text{diag} \left(\frac{\xi_{ij}}{\mu_{ij} F_{z_{ij}} R_c} \right)$, $\xi_{ij} = \frac{\Omega_{ij}}{\sum \Omega_{ij}}$;

[0190] 则总目标函数为:

$$[0191] \quad \min_{\eta} I = I_1 + I_2 = \|\eta - \Lambda \chi\|_S^2 + \|\Theta \eta\|_W^2$$

[0192] 根据路面附着条件设置摩擦椭圆约束:

$$[0193] \quad F_{x_{ij}}^2 + F_{y_{ij}}^2 \leq (\mu_{ij} F_{z_{ij}})^2$$

[0194] 根据机械约束, 对四轮毂电机转矩设置约束:

$$[0195] \quad \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$$

[0196] 其中, η 、 η_{\max} 、 η_{\min} 分别为四轮毂电机转矩及其最大最小值;

[0197] 求解带约束的优化函数即得到四轮毂电机转矩最优控制序列。

[0198] 应理解, 本发明实施例中各步骤的序号的大小并不意味着执行顺序的先后, 各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定, 而不应对本发明实施例的实施过程构成任何限定。

[0199] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例, 对于本领域的普通技术人员而言, 可以

理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

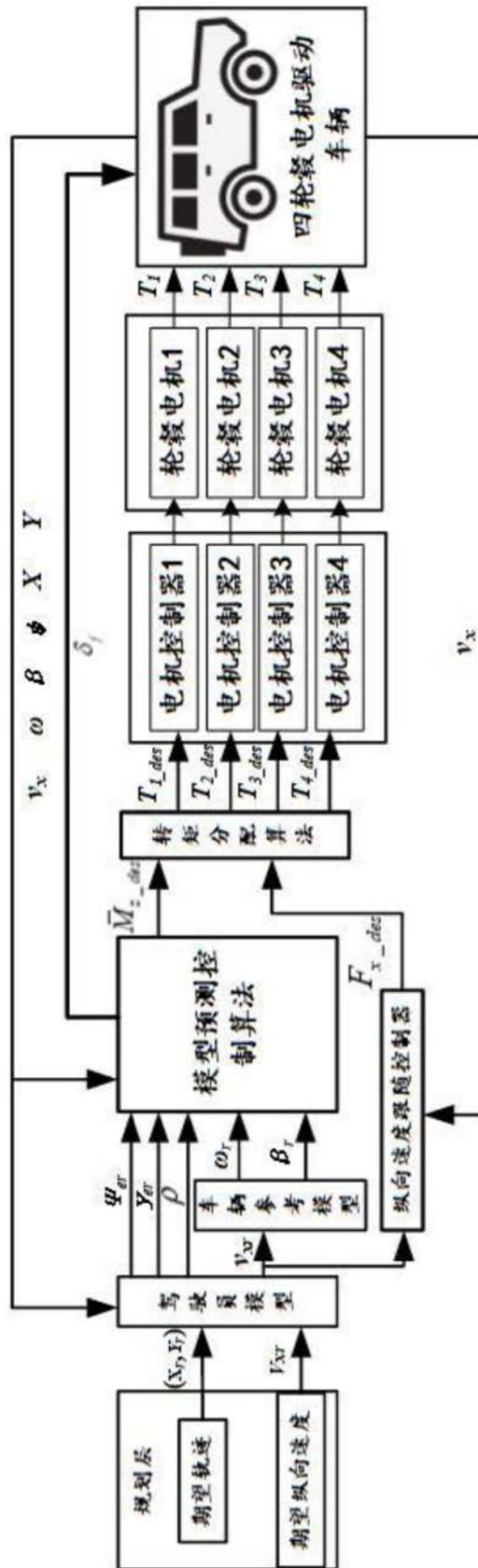


图1

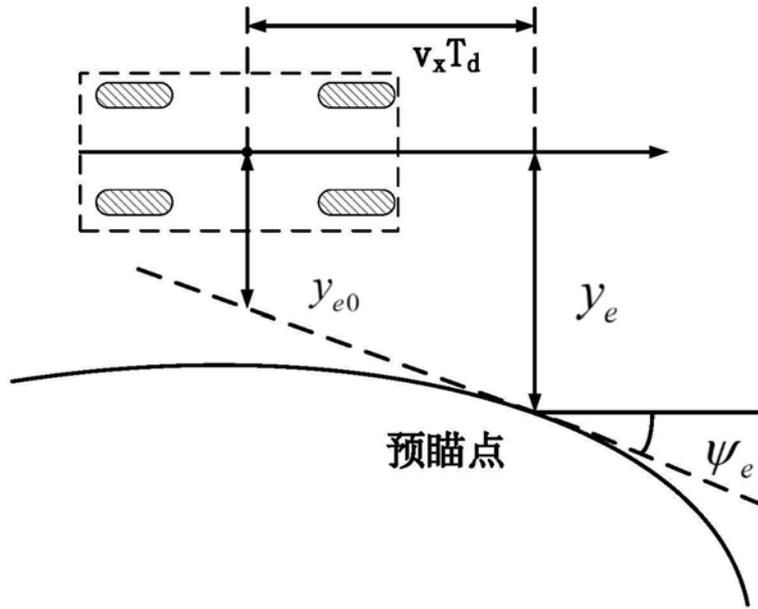


图2

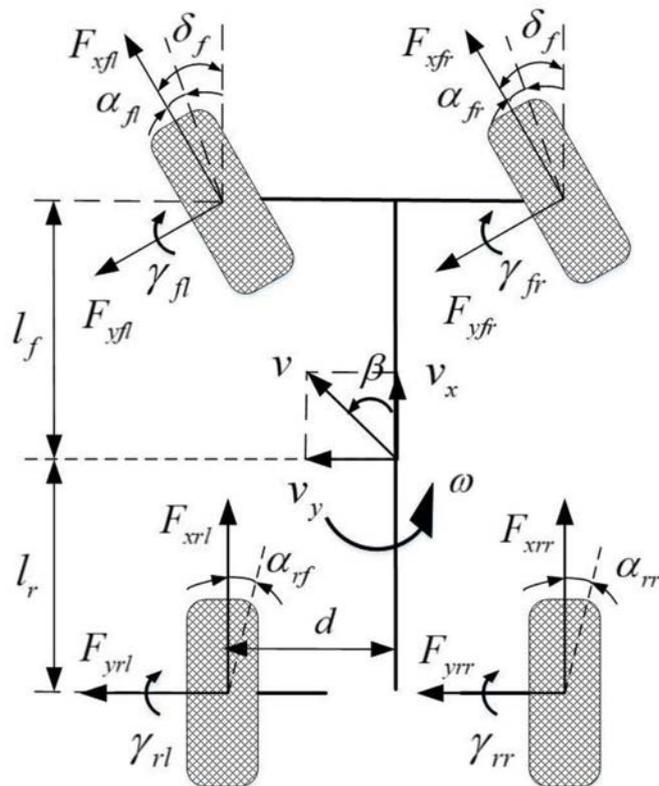


图3

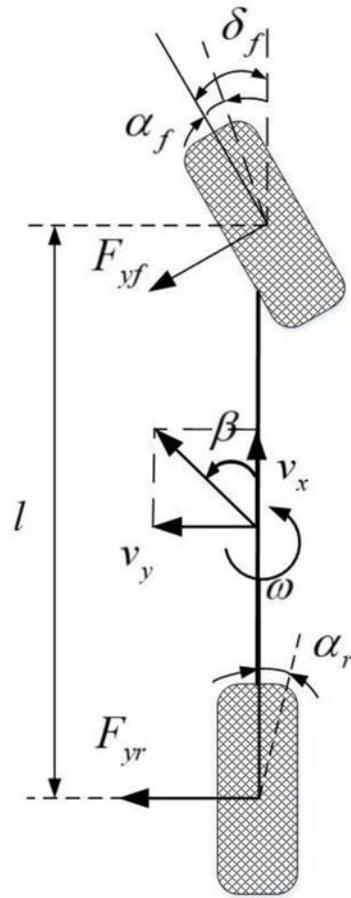


图4