



(10)申请公布号 CN 106985703 A

(21)申请号 201710135260.3

(22)申请日 2017.03.08

(71)申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72)发明人 能璐 李斌 冷搏 孙凯 余卓平

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 宣慧兰

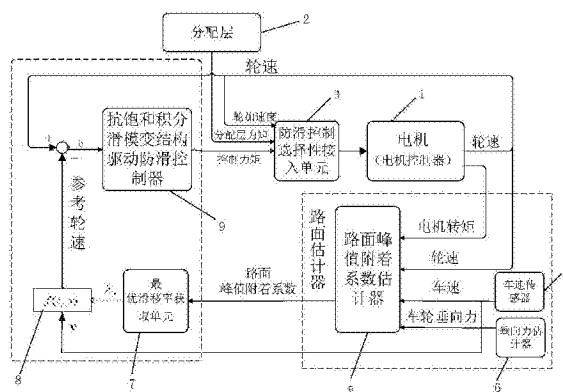
(51) Int.Cl.

B60L 15/20(2006.01)

权利要求书3页 说明书8页 附图1页

一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统及方法

本发明涉及一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统及方法,该系统包括电机控制器、电机力矩分配器、实测传感器单元、非线性路面估计单元、防滑控制选择性接入单元和驱动防滑控制单元,非线性路面估计单元用于获取每个车轮的路面峰值附着系数,驱动防滑控制单元根据非线性路面估计单元获取的车轮的路面峰值附着系数以及实测传感器单元的实测数据进行防滑控制输出控制力矩,防滑控制选择性接入单元根据驱动防滑控制单元输出控制力矩、电机力矩分配器的分配力矩以及实测传感器单元的实测数据进行逻辑判断进而输出控制力矩或分配力矩至电机控制器,电机控制器控制4个驱动电机运动。与现有技术相比,本发明控制精确性高,防滑效果好。



1. 一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 该系统包括电机控制器 (1) 和电机力矩分配器 (2), 所述的电机控制器 (1) 设置4个分别连接对应4个车轮的驱动电机, 其特征在于, 该系统还包括实测传感器单元、非线性路面估计单元、防滑控制选择性接入单元 (3) 和驱动防滑控制单元, 所述的实测传感器单元连接非线性路面估计单元和驱动防滑控制单元, 所述的非线性路面估计单元用于获取每个车轮的路面峰值附着系数, 所述的非线性路面估计单元连接驱动防滑控制单元, 所述的驱动防滑控制单元用于获取4个驱动电机的控制力矩, 所述的防滑控制选择性接入单元 (3) 设置在驱动防滑控制单元和电机控制器 (1) 之间, 所述的防滑控制选择性接入单元 (3) 还连接电机力矩分配器 (2) 和实测传感器单元;

驱动防滑控制单元根据非线性路面估计单元获取的车轮的路面峰值附着系数以及实测传感器单元的实测数据进行防滑控制输出控制力矩, 防滑控制选择性接入单元 (3) 根据驱动防滑控制单元输出控制力矩、电机力矩分配器 (2) 的分配力矩以及实测传感器单元的实测数据进行逻辑判断进而输出控制力矩或分配力矩至电机控制器 (1), 电机控制器 (1) 控制4个驱动电机运动。

2. 根据权利要求1所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 其特征在于, 所述的实测传感器单元包括用于测量车速的车速传感器 (4)、用于测量纵侧向加速度的加速度传感器、用于获取4个车轮实际轮速的轮速获取子单元、用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元以及用于获取纵侧向加速度的加速度传感器, 所述的车速传感器 (4)、轮速获取子单元、转矩获取子单元和加速度传感器均连接至非线性路面估计单元, 所述的车速传感器 (4) 和轮速获取子单元连接至驱动防滑控制单元, 所述的轮速获取子单元连接防滑控制选择性接入单元 (3)。

3. 根据权利要求2所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 其特征在于, 所述的非线性路面估计单元包括路面峰值附着系数估计器 (5) 和垂向力估计器 (6), 所述的路面峰值附着系数估计器 (5) 输入端连接车速传感器 (4)、轮速获取子单元、转矩获取子单元和垂向力估计器 (6), 所述路面峰值附着系数估计器 (5) 输出端连接驱动防滑控制单元, 所述的加速度传感器连接垂向力估计器 (6)。

4. 根据权利要求3所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 其特征在于, 所述的垂向力估计器 (6) 具体为:

$$\begin{aligned} F_z^{fl} &= mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y \\ F_z^{fr} &= mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_f l} a_y \\ F_z^{rl} &= mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y \\ F_z^{rr} &= mg \frac{l_r}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_r}{B_r l} a_y \end{aligned}$$

F_z^{fl} 、 F_z^{fr} 、 F_z^{rl} 和 F_z^{rr} 分别为左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的垂向力, m 为整车质量, g 为重力加速度, l 为轴距、 l_f 为质心至前轴距离, l_r 为质心至后轴距离、 h_g 为质心高度, a_x 为

纵向加速度, a_y 为侧向加速度。

5. 根据权利要求3所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 其特征在于, 所述的路面峰值附着系数估计器 (5) 具体为:

$$\begin{aligned}\dot{z} &= -\frac{k_1}{I}(T_m + r\hat{F}_x) + \frac{rF_z}{I} \frac{\partial \mu(\lambda, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} u_\theta(t) \\ \hat{F}_x &= F_z \mu(\lambda, \hat{\theta}) + \frac{I}{r}(z + k_1 \omega) \\ u_\theta(t) &= \dot{\hat{\theta}} = \gamma(\theta^* - \hat{\theta})\end{aligned}$$

其中, z 为中间变量, I 为车轮等效转动惯量, T_m 为电机转矩, r 为车轮滚动半径, $\hat{F}_x$ 为车轮纵向力估计值, F_z 为垂向力估计器 (6) 估计的车轮垂向力, $\hat{\theta}$ 为路面峰值附着系数估计值, λ 为车轮滑移率, $\lambda = (\omega r - v) / v$, ω 为轮速获取子单元获取的实际轮速, v 为车速传感器 (4) 测量的车速, θ^* 为等式方程 $\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \theta)$ 的数值解, k_1 和 γ 为估计器设计参数, k_1 和 γ 均为常数, $\mu(\lambda, \theta)$ 为改进的Burckhardt轮胎模型, $\mu(\lambda, \hat{\theta})$ 为 $\mu(\lambda, \theta)$ 中令 $\theta = \hat{\theta}$ 得到的模型函数, 具体地, $\mu(\lambda, \theta)$ 为:

$$\mu(\lambda, \theta) = \theta - \theta \exp\left[-\frac{\theta_2}{\theta}(\lambda + \theta_3 \lambda^2)\right] - \theta_3 \lambda \operatorname{sgn}(\lambda) + \theta_4 \lambda^2,$$

其中, θ 为路面峰值附着系数, θ_2 、 θ_3 、 θ_4 和 θ_5 均为常参数, $\exp$ 为以自然常数 e 为底的指数函数, sgn 为符号函数。

6. 根据权利要求2所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 其特征在于, 所述的驱动防滑控制单元包括最优滑移率获取单元 (7)、参考轮速计算单元 (8)、轮速差值计算单元和抗饱和积分滑模变结构控制器 (9), 所述的最优滑移率获取单元 (7) 输入端连接非线性路面估计单元, 最优滑移率获取单元 (7) 输出端连接参考轮速计算单元 (8) 输入端, 参考轮速计算单元 (8) 输入端还连接车速传感器 (4), 参考轮速计算单元 (8) 输出端连接轮速差值计算单元负输入端, 轮速差值计算单元正输入端连接轮速获取子单元, 轮速差值计算单元输出端连接抗饱和积分滑模变结构控制器 (9) 输入端, 抗饱和积分滑模变结构控制器 (9) 输出端连接防滑控制选择性接入单元 (3), 所述的最优滑移率获取单元 (7) 为预先设置的路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图;

最优滑移率获取单元 (7) 根据非线性路面估计单元得到的4个车轮的路面峰值附着系数查找对应的最优滑移率, 参考轮速计算单元 (8) 根据最优滑移率和车速传感器 (4) 获取的车速计算每个车轮的参考轮速, 抗饱和积分滑模变结构控制器 (9) 根据轮速获取子单元获取的实际轮速以及参考轮速计算单元 (8) 计算的参考轮速的差值进行控制输出每个车轮对应的驱动电机的控制力矩。

7. 根据权利要求6所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统, 其特征在于, 所述的参考轮速计算单元 (8) 具体为:

$$\omega_r = \frac{\lambda_r v + v}{r},$$

其中, ω_r 为参考轮速, λ_r 为最优滑移率, v 为车速, r 为车轮滚动半径。

8. 根据权利要求6所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统,其特征
在于,所述的抗饱和积分滑模变结构控制器(9)具体为:

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= -k_0 \rho + \delta \text{sat}\left(\frac{e + k_0 \rho}{\delta}\right) \\ T_{\text{ctr}} &= -\frac{1}{2} \bar{T} \text{sat}\left(\frac{e + k_0 \rho}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \bar{T}\end{aligned}$$

其中, ρ 为条件积分项, δ 为滑模控制的切换曲面附近的边界层厚度, k_0 为积分增益, T_{ctr}
为控制力矩, $\bar{T}$ 为电机力矩上限, sat 为饱和函数, $e = \omega - \omega_r$, ω 为实际轮速, ω_r 为参考轮
速。

9. 根据权利要求1所述的一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统,其特征
在于,防滑控制选择性接入单元(3)设置逻辑控制器,所述的逻辑控制器具体为:

$$\begin{aligned}\text{if } \dot{\omega}_r > \dot{v} + \Delta, \quad \text{flag_}\omega(n) &= 1 \\ \text{else} \quad \text{flag_}\omega(n) &= 0, \\ \text{if } T_{\text{分配}} > k_{\text{up}} * T_{\text{ctr}}, \quad \text{flag_}T(n) &= 1 \\ \text{if } T_{\text{分配}} < k_{\text{low}} * T_{\text{ctr}}, \quad \text{flag_}T(n) &= 0, \\ \text{else } \text{flag_}T(n) &= \text{flag_}T(n-1) \\ \text{if } \text{flag_}\omega(n) = 0 \text{ and } \text{flag_}T(n) = 0, \quad \text{flag}(n) &= 0 \\ \text{if } \text{flag_}\omega(n) = 0 \text{ and } \text{flag_}T(n) = 1, \quad \text{flag}(n) &= \text{flag}(n-1) \\ \text{if } \text{flag_}\omega(n) = 1 \text{ and } \text{flag_}T(n) = 0, \quad \text{flag}(n) &= 0 \\ \text{if } \text{flag_}\omega(n) = 1 \text{ and } \text{flag_}T(n) = 1, \quad \text{flag}(n) &= 1\end{aligned}$$

若 $\text{flag}=1$,防滑控制选择性接入单元(3)选择驱动防滑控制单元的控制力矩输出,若
 $\text{flag}=0$ 防滑控制选择性接入单元(3)选择电机力矩分配器(2)的分配力矩输出;

其中, Δ 、 k_{up} 和 k_{low} 均为标定参数, ω 为实际轮速, v 为车速, r 为车轮滚动半径, $T_{\text{分配}}$ 为分
配力矩, T_{ctr} 为控制力矩, n 表示第 n 个时刻, $\text{flag_}\omega(n)$ 、 $\text{flag_}T(n)$ 和 $\text{flag}(n)$ 分别为第 n 个
时刻的角加速度标志位、力矩标志位和整体标志位, $\text{flag_}T(n-1)$ 和 $\text{flag}(n-1)$ 表示第 $(n-1)$
个时刻的角加速度标志位、力矩标志位和整体标志位。

10. 一种采用如权利要求1~9任意一项所述的分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控
制系统的控制方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

- (1) 实时采集4个车轮的实际轮速 ω 、对应的驱动电机的转矩以及整车的车速 v ;
- (2) 将采集的数据输入至非线性路面估计单元估计得到4个车轮对应的路面峰值附着
系数;
- (3) 在预先设置的路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图中查找得到与步
骤(2)得到的路面峰值附着系数匹配的最优滑移率;
- (4) 根据最优滑移率和车速 v 求取每个车轮对应的参考轮速 ω_r ;
- (5) 将实际轮速 ω 和参考轮速 ω_r 的差值 $e = \omega - \omega_r$ 输入至预先设计的抗饱和积分滑模
变结构控制器(9)得到控制力矩 T_{ctr} ;
- (6) 根据控制力矩 T_{ctr} 和外部分配层电机力矩分配器(2)的分配力矩 $T_{\text{分配}}$ 选择性输入至
电机控制器(1)进行4个车轮的驱动电机的控制。

一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种分布式驱动电动汽车防滑控制系统及方法,尤其是涉及一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统及方法。

背景技术

[0002] 分布式驱动电动汽车采用轮边电机或轮毂电机驱动,不需要传统内燃机汽车的离合器、变速器、主减速器及差速器等部件,从而简化了整车结构,提高了传动效率。同时通过电机控制器能较精确地获取当前的电机输出的转速及力矩,并且电机的响应时间一般在毫秒级。汽车在起步或者加速阶段驱动轮的过度滑转是由于驱动扭矩超出了轮胎与地面间的附着极限,过度滑转使轮胎磨损,驱动效率降低,侧向稳定性降低。因此,为了避免在行驶过程中过大的滑移率,需要采取合理的控制方法来减小驱动轮上的驱动力矩,从而将滑动率控制在一个最佳范围内。

[0003] 驱动防滑控制现阶段的方法有逻辑门限值控制、PID控制、模糊控制、最优控制、神经网络控制、滑模变结构控制等各种控制策略,各有其优缺点。

[0004] (1) 逻辑门限值控制不涉及被控系统的具体数学模型,便于实现对非线性系统的控制,但是它的控制逻辑比较复杂,波动较大。

[0005] (2) PID控制可以将滑转率控制到设定值,但是要求在不同路面上的设置不同参数,因此也就需要PID控制可以实现在线自适应调整。

[0006] (3) 模糊控制通过模糊推理,进行判断决策,达到控制效果。但是该方法模糊控制规则的建立较为困难,调试难度也大。

[0007] (4) 最优控制按照最优原理来求解驱动防滑控制系统的最优指标,其效果依赖于系统的数学模型精度,在实际应用中较难实现。

[0008] (5) 滑模变结构控制使得系统控制变量的相轨迹可以沿切换线滑向控制目标,这种控制方法具有较强的鲁棒性,但是在滑模面附近,控制力矩会产生高频抖动。

发明内容

[0009] 本发明的目的就是为了克服上述现有技术存在的缺陷而提供一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统及方法。

[0010] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0011] 一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统,该系统包括电机控制器和电机力矩分配器,所述的电机控制器设置4个分别连接对应4个车轮的驱动电机,该系统还包括实测传感器单元、非线性路面估计单元、防滑控制选择性接入单元和驱动防滑控制单元,所述的实测传感器单元连接非线性路面估计单元和驱动防滑控制单元,所述的非线性路面估计单元用于获取每个车轮的路面峰值附着系数,所述的非线性路面估计单元连接驱动防滑控制单元,所述的驱动防滑控制单元用于获取4个驱动电机的控制力矩,所述的防滑控制选择性接入单元设置在驱动防滑控制单元和电机控制器之间,所述的防滑控制选择性接入

单元还连接电机力矩分配器和实测传感器单元；

[0012] 驱动防滑控制单元根据非线性路面估计单元获取的车轮的路面峰值附着系数以及实测传感器单元的实测数据进行防滑控制输出控制力矩，防滑控制选择性接入单元根据驱动防滑控制单元输出控制力矩、电机力矩分配器的分配力矩以及实测传感器单元的实测数据进行逻辑判断进而输出控制力矩或分配力矩至电机控制器，电机控制器控制4个驱动电机运动。

[0013] 所述的实测传感器单元包括用于测量车速的车速传感器、用于测量纵侧向加速度的加速度传感器、用于获取4个车轮实际轮速的轮速获取子单元、用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元以及用于获取纵侧向加速度的加速度传感器，所述的车速传感器、轮速获取子单元、转矩获取子单元和加速度传感器均连接至非线性路面估计单元，所述的车速传感器和轮速获取子单元连接至驱动防滑控制单元，所述的轮速获取子单元连接防滑控制选择性接入单元。

[0014] 所述的非线性路面估计单元包括路面峰值附着系数估计器和垂向力估计器，所述的路面峰值附着系数估计器输入端连接车速传感器、轮速获取子单元、转矩获取子单元和垂向力估计器，所述路面峰值附着系数估计器输出端连接驱动防滑控制单元，所述的加速度传感器连接垂向力估计器。

[0015] 所述的垂向力估计器具体为：

$$\begin{aligned}
 F_z^{fl} &= mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y \\
 F_z^{fr} &= mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_f l} a_y \\
 F_z^{rl} &= mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y \\
 F_z^{rr} &= mg \frac{l_r}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_r}{B_r l} a_y
 \end{aligned}$$

[0016]

[0017] F_z^{fl} 、 F_z^{fr} 、 F_z^{rl} 和 F_z^{rr} 分别为左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的垂向力，m为整车质量，g为重力加速度，l为轴距， l_f 为质心至前轴距离， l_r 为质心至后轴距离、 h_g 为质心高度， a_x 为纵向加速度， a_y 为侧向加速度。

[0018] 所述的路面峰值附着系数估计器具体为：

$$\begin{aligned}
 \dot{z} &= -\frac{k_1}{I} (T_m + r \hat{F}_x) + \frac{r F_z}{I} \frac{\partial \mu(\lambda, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} u_\theta(t) \\
 \hat{F}_x &= F_z \mu(\lambda, \hat{\theta}) + \frac{I}{r} (z + k_1 \omega) \\
 u_\theta(t) &= \dot{\hat{\theta}} = \gamma (\theta^* - \hat{\theta})
 \end{aligned}$$

[0019]

[0020] 其中，z为中间变量，I为车轮等效转动惯量， T_m 为电机转矩，r为车轮滚动半径， $\hat{F}_x$ 为车轮纵向力估计值， F_z 为垂向力估计器估计的车轮垂向力， $\hat{\theta}$ 为路面峰值附着系数估计值， λ 为车轮滑移率， $\lambda = (\omega r - v) / v$ ， ω 为轮速获取子单元获取的实际轮速，v为车速传感器

测量的车速, θ^* 为等式方程 $\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \theta)$ 的数值解, k_1 和 γ 为估计器设计参数, k_1 和 γ 均为常数, $\mu(\lambda, \theta)$ 为改进的Burckhardt轮胎模型, $\mu(\lambda, \hat{\theta})$ 为 $\mu(\lambda, \theta)$ 中令 $\theta = \hat{\theta}$ 得到的模型函数, 具体地, $\mu(\lambda, \theta)$ 为:

$$[0021] \quad \mu(\lambda, \theta) = \theta - \theta \exp\left[-\frac{\theta_2}{\theta}(\lambda + \theta_3 \lambda^2)\right] - \theta_3 \lambda \operatorname{sgn}(\lambda) + \theta_4 \lambda^2,$$

[0022] 其中, θ 为路面峰值附着系数, θ_2 、 θ_3 、 θ_4 和 θ_5 均为常参数, $\exp$ 为以自然常数 e 为底的指数函数, sgn 为符号函数。

[0023] 所述的驱动防滑控制单元包括最优滑移率获取单元、参考轮速计算单元、轮速差值计算单元和抗饱和积分滑模变结构控制器, 所述的最优滑移率获取单元输入端连接非线性路面估计单元, 最优滑移率获取单元输出端连接参考轮速计算单元输入端, 参考轮速计算单元输入端还连接车速传感器, 参考轮速计算单元输出端连接轮速差值计算单元负输入端, 轮速差值计算单元正输入端连接轮速获取子单元, 轮速差值计算单元输出端连接抗饱和积分滑模变结构控制器输入端, 抗饱和积分滑模变结构控制器输出端连接防滑控制选择性接入单元, 所述的最优滑移率获取单元为预先设置的路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图;

[0024] 最优滑移率获取单元根据非线性路面估计单元得到的4个车轮的路面峰值附着系数查找对应的最优滑移率, 参考轮速计算单元根据最优滑移率和车速传感器获取的车速计算每个车轮的参考轮速, 抗饱和积分滑模变结构控制器根据轮速获取子单元获取的实际轮速以及参考轮速计算单元计算的参考轮速的差值进行控制输出每个车轮对应的驱动电机的控制力矩。

[0025] 所述的参考轮速计算单元具体为:

$$[0026] \quad \omega_r = \frac{\lambda_r v + v}{r},$$

[0027] 其中, ω_r 为参考轮速, λ_r 为最优滑移率, v 为车速, r 为车轮滚动半径。

[0028] 所述的抗饱和积分滑模变结构控制器具体为:

$$[0029] \quad \begin{aligned} \dot{\rho} &= -k_0 \rho + \delta \operatorname{sat}\left(\frac{e + k_0 \rho}{\delta}\right) \\ T_{\text{ctr}} &= -\frac{1}{2} \bar{T} \operatorname{sat}\left(\frac{e + k_0 \rho}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \bar{T} \end{aligned}$$

[0030] 其中, ρ 为条件积分项, δ 为滑模控制的切换曲面附近的边界层厚度, k_0 为积分增益, T_{ctr} 为控制力矩, $\bar{T}$ 为电机力矩上限, sat 为饱和函数, $e = \omega - \omega_r$, ω 为实际轮速, ω_r 为参考轮速。

[0031] 防滑控制选择性接入单元设置逻辑控制器, 所述的逻辑控制器具体为:

$$[0032] \quad \begin{aligned} &\text{if} \quad \dot{\omega} r > \dot{v} + \Delta, \quad \text{flag_} \omega(n) = 1 \\ &\text{else} \quad \text{flag_} \omega(n) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{if } T_{\text{分配}} > k_{up} * T_{ctr}, \quad \text{flag_}T(n)=1$$
 [0033]
$$\text{if } T_{\text{分配}} < k_{low} * T_{ctr}, \quad \text{flag_}T(n)=0,$$

$$\text{else } \text{flag_}T(n)=\text{flag_}T(n-1)$$

$$\text{if } \text{flag_}\omega(n)=0 \text{ and } \text{flag_}T(n)=0, \quad \text{flag}(n)=0$$
 [0034]
$$\text{if } \text{flag_}\omega(n)=0 \text{ and } \text{flag_}T(n)=1, \quad \text{flag}(n)=\text{flag}(n-1),$$

$$\text{if } \text{flag_}\omega(n)=1 \text{ and } \text{flag_}T(n)=0, \quad \text{flag}(n)=0$$

$$\text{if } \text{flag_}\omega(n)=1 \text{ and } \text{flag_}T(n)=1, \quad \text{flag}(n)=1$$

[0035] 若flag=1,防滑控制选择性接入单元选择驱动防滑控制单元的控制力矩输出,若flag=0防滑控制选择性接入单元选择电机力矩分配器的分配力矩输出;

[0036] 其中, Δ 、 k_{up} 和 k_{low} 均为标定参数, ω 为实际轮速, v 为车速, r 为车轮滚动半径, $T_{\text{分配}}$ 为分配力矩, T_{ctr} 为控制力矩, n 表示第 n 个时刻,flag_ ω (n)、flag_ T (n)和flag(n)分别为第 n 个时刻的角加速度标志位、力矩标志位和整体标志位,flag_ T ($n-1$)和flag($n-1$)表示第($n-1$)个时刻的角加速度标志位、力矩标志位和整体标志位。

[0037] 一种采用上述分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统的控制方法,该方法包括如下步骤:

[0038] (1) 实时采集4个车轮的实际轮速 ω 、对应的驱动电机的转矩以及整车的车速 v ;

[0039] (2) 将采集的数据输入至非线性路面估计单元估计得到4个车轮对应的路面峰值附着系数;

[0040] (3) 在预先设置的路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图中查找得到与步骤(2)得到的路面峰值附着系数匹配的最优滑移率;

[0041] (4) 根据最优滑移率和车速 v 求取每个车轮对应的参考轮速 ω_r ;

[0042] (5) 将实际轮速 ω 和参考轮速 ω_r 的差值 $e = \omega - \omega_r$ 输入至预先设计的抗饱和和积分滑模变结构控制器得到控制力矩 T_{ctr} ;

[0043] (6) 根据控制力矩 T_{ctr} 和外部分配层电机力矩分配器的分配力矩 $T_{\text{分配}}$ 选择性输入至电机控制器进行4个车轮的驱动电机的控制。

[0044] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0045] (1) 本发明设置防滑控制选择性接入单元避免了控制力矩影响外部电机力矩分配器的分配层力矩,当根据判据判断驱动防滑算法介入时,本发明设计的驱动防滑控制单元控制驱动电机力矩输出,当驱动防滑算法退出时,电机执行外部电机力矩分配器的分配层力矩,从而做到在汽车正常运行时又能有效防滑;

[0046] (2) 本发明驱动防滑控制单元中采用了抗饱和和积分滑模变结构控制器,在滑模控制的切换曲面附近增加了边界层,在边界层外部选择已有的控制规律,可保证边界层是吸引的,因此是不变集,所有从边界层内出发的轨迹线仍会停留在边界层之内,在边界层内采用条件积分控制器构成改进的滑模控制器,尽可能消除高频抖动,保证控制器的控制精确性,提高防滑控制效果;

[0047] (3) 本发明结合车轮动力学,设计了非线性路面估计单元,通过采集车辆运行过程中的状态获取最优滑移率,进而通过最优滑移率进行调整驱动电机的控制力矩,进而改变车辆运行状态,构成自适应的驱动防滑控制系统。

附图说明

[0048] 图1为本发明分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统的结构框图；

[0049] 图2为路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图；

[0050] 图中,1为电机控制器,2为电机力矩分配器,3为防滑控制选择性接入单元,4为车速传感器,5为路面峰值附着系数估计器,6为垂向力估计器,7为最优滑移率获取单元,8为参考轮速计算单元,9为抗饱和和积分滑模变结构控制器。

具体实施方式

[0051] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0052] 实施例

[0053] 如图1所示,一种分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统,该系统包括电机控制器1和电机力矩分配器2,电机控制器1设置4个分别连接对应4个车轮的驱动电机,该系统还包括实测传感器单元、非线性路面估计单元、防滑控制选择性接入单元3和驱动防滑控制单元,实测传感器单元连接非线性路面估计单元和驱动防滑控制单元,非线性路面估计单元用于获取每个车轮的路面峰值附着系数,非线性路面估计单元连接驱动防滑控制单元,驱动防滑控制单元用于获取4个驱动电机的控制力矩,防滑控制选择性接入单元3设置在驱动防滑控制单元和电机控制器1之间,防滑控制选择性接入单元3还连接电机力矩分配器2和实测传感器单元；

[0054] 驱动防滑控制单元根据非线性路面估计单元获取的车轮的路面峰值附着系数以及实测传感器单元的实测数据进行防滑控制输出控制力矩,防滑控制选择性接入单元3根据驱动防滑控制单元输出控制力矩、电机力矩分配器2的分配力矩以及实测传感器单元的实测数据进行逻辑判断进而输出控制力矩或分配力矩至电机控制器1,电机控制器1控制4个驱动电机运动。

[0055] 实测传感器单元包括用于测量车速的车速传感器4、用于测量纵侧向加速度的加速度传感器、用于获取4个车轮实际轮速的轮速获取子单元、用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元以及用于获取纵侧向加速度的加速度传感器,车速传感器4、轮速获取子单元、转矩获取子单元和加速度传感器均连接至非线性路面估计单元,车速传感器4和轮速获取子单元连接至驱动防滑控制单元,轮速获取子单元连接防滑控制选择性接入单元3。

[0056] 非线性路面估计单元包括路面峰值附着系数估计器5和垂向力估计器6,路面峰值附着系数估计器5输入端连接车速传感器4、轮速获取子单元、转矩获取子单元和垂向力估计器6,所述路面峰值附着系数估计器5输出端连接驱动防滑控制单元,加速度传感器连接垂向力估计器6。

[0057] 垂向力估计器6具体为：

$$\begin{aligned}
F_z^{fl} &= mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y \\
F_z^{fr} &= mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_f l} a_y \\
F_z^{rl} &= mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y \\
F_z^{rr} &= mg \frac{l_r}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_r}{B_r l} a_y
\end{aligned}
\quad [0058]$$

[0059] F_z^{fl} 、 F_z^{fr} 、 F_z^{rl} 和 F_z^{rr} 分别为左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的垂向力,m为整车质量,g为重力加速度,l为轴距、 l_f 为质心至前轴距离、 l_r 为质心至后轴距离、 h_g 为质心高度、 a_x 为纵向加速度、 a_y 为侧向加速度。

[0060] 路面峰值附着系数估计器5具体为:

$$\begin{aligned}
\dot{z} &= -\frac{k_1}{I} (T_m + r \hat{F}_x) + \frac{r F_z}{I} \frac{\partial \mu(\lambda, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} u_\theta(t) \\
\hat{F}_x &= F_z \mu(\lambda, \hat{\theta}) + \frac{I}{r} (z + k_1 \omega) \\
u_\theta(t) &= \dot{\hat{\theta}} = \gamma (\theta^* - \hat{\theta})
\end{aligned}
\quad [0061]$$

[0062] 其中,z为中间变量,I为车轮等效转动惯量, T_m 为电机转矩,r为车轮滚动半径, $\hat{F}_x$ 为车轮纵向力估计值, F_z 为垂向力估计器6估计的车轮垂向力, $\hat{\theta}$ 为路面峰值附着系数估计值, λ 为车轮滑移率, $\lambda = (\omega r - v) / v$, ω 为轮速获取子单元获取的实际轮速,v为车速传感器4测量的车速, θ^* 为等式方程 $\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \theta)$ 的数值解, k_1 和 γ 为估计器设计参数, k_1 和 γ 均为常数, $\mu(\lambda, \theta)$ 为改进的Burckhardt轮胎模型, $\mu(\lambda, \hat{\theta})$ 为 $\mu(\lambda, \theta)$ 中令 $\theta = \hat{\theta}$ 得到的模型函数。

[0063] 传统的Burckhardt轮胎模型能较为简单地描述轮胎滑移率与纵向力之间的关系:

$$\mu(\lambda) = c_1 [1 - \exp(-c_2 \lambda)] - c_3 \lambda, \quad [0064]$$

[0065] 式中, c_i ($i = 1, 2, 3$) 随路面状况的变化而变化,通过试验测试数据拟合得到。现为了更好地描述大滑移率下 $\mu-\lambda$ 的曲线形状,将模型参数从三个增加到五个,采用改进的Burckhardt轮胎模型:

[0066] 具体地, $\mu(\lambda, \theta)$ 为:

$$\mu(\lambda, \theta) = \theta - \theta \exp\left[-\frac{\theta_2}{\theta} (\lambda + \theta_3 \lambda^2)\right] - \theta_3 \lambda \operatorname{sgn}(\lambda) + \theta_4 \lambda^2, \quad [0067]$$

[0068] 其中, θ 为路面峰值附着系数, θ_2 、 θ_3 、 θ_4 和 θ_5 均为常参数, $\exp$ 为以自然常数e为底的指数函数, sgn 为符号函数。

[0069] 假设在取定的其他参数下, $\hat{\theta}$ 与 $\mu(\lambda, \hat{\theta})$ 是一一对应的,则在路面峰值附着系数估计器5进行估计更新时,参数估计误差 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 是全局渐进稳定且局部指数稳定的。但是当 λ 非常小时, $\partial \mu(\lambda, \hat{\theta}) / \partial \hat{\theta}$ 趋向于0,因此以上结论中 $\hat{\theta}$ 与 $\mu(\lambda, \hat{\theta})$ 一一对应这一条件会出现退化。此时如果继续进行参数估计,则估计器的稳定性难以保证,因而增加参数更新机制:

$$[0070] \quad \dot{\hat{\theta}} = \begin{cases} \gamma(\theta^* - \hat{\theta}) & \lambda \geq \varepsilon \hat{\lambda}_{opt} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0071] 其中 $\varepsilon \in (0, 1)$, 这里取 0.8。表示仅当车轮工作滑移率相对当前估计路面的峰值滑移率 $\hat{\lambda}_{opt}$ 充分大的时候才开始估计。

[0072] 驱动防滑控制单元包括最优滑移率获取单元7、参考轮速计算单元8、轮速差值计算单元和抗饱和积分滑模变结构控制器9, 最优滑移率获取单元7输入端连接非线性路面估计单元, 最优滑移率获取单元7输出端连接参考轮速计算单元8输入端, 参考轮速计算单元8输入端还连接车速传感器4, 参考轮速计算单元8输出端连接轮速差值计算单元负输入端, 轮速差值计算单元正输入端连接轮速获取子单元, 轮速差值计算单元输出端连接抗饱和积分滑模变结构控制器9输入端, 抗饱和积分滑模变结构控制器9输出端连接防滑控制选择性接入单元3, 最优滑移率获取单元7为预先设置的路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图; 最优滑移率获取单元7根据非线性路面估计单元得到的4个车轮的路面峰值附着系数查找对应的最优滑移率, 参考轮速计算单元8根据最优滑移率和车速传感器4获取的车速计算每个车轮的参考轮速, 抗饱和积分滑模变结构控制器9根据轮速获取子单元获取的实际轮速以及参考轮速计算单元8计算的参考轮速的差值进行控制输出每个车轮对应的驱动电机的控制力矩。

[0073] 根据路面估计器估计的路面峰值附着系数更新结果, 对参考滑移率进行修正。从而能够实现在不同路面峰值附着系数下滑移率控制的自适应调整, 具体方法如下:

[0074] 利用改进的Burckhardt轮胎模型, 对滑移率求导, 得到:

$$[0075] \quad \frac{d\mu}{d\lambda} = -\hat{\theta} \exp\left[-\frac{\theta_2}{\hat{\theta}}(\lambda + \theta_3 \lambda^2)\right] * \left[-\frac{\theta_2}{\hat{\theta}}(1 + 2\theta_3 \lambda)\right] - \theta_3 + 2\theta_4 \lambda,$$

[0076] 此式为0时的 λ 取值, 即为此路面下的最优滑移率。将表征路面峰值附着系数的参数 $\hat{\theta}$ 以 0.1 为间隔, 从 0.1 到 1 进行取值计算, 得到图2所示路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图。

[0077] 参考轮速计算单元8具体为:

$$[0078] \quad \omega_r = \frac{\lambda_r v + v}{r},$$

[0079] 其中, ω_r 为参考轮速, λ_r 为最优滑移率, v 为车速, r 为车轮滚动半径。

[0080] 抗饱和积分滑模变结构控制器9具体为:

$$[0081] \quad \begin{aligned} \dot{\rho} &= -k_0 \rho + \delta \text{sat}\left(\frac{e + k_0 \rho}{\delta}\right) \\ T_{ctr} &= -\frac{1}{2} \bar{T} \text{sat}\left(\frac{e + k_0 \rho}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \bar{T} \end{aligned}$$

[0082] 其中, ρ 为条件积分项, δ 为滑模控制的切换曲面附近的边界层厚度, k_0 为积分增益, T_{ctr} 为控制力矩, $\bar{T}$ 为电机力矩上限, sat 为饱和函数, $e = \omega - \omega_r$, ω 为实际轮速, ω_r 为参考轮速。

[0083] 防滑控制选择性接入单元3设置逻辑控制器, 逻辑控制器具体为:

```

[0084]   if  $\dot{\omega}r > \dot{v} + \Delta$ ,  $flag\_ \omega(n) = 1$ 
           else  $flag\_ \omega(n) = 0$  ,
           if  $T_{分配} > k_{up} * T_{ctr}$ ,  $flag\_ T(n) = 1$ 
[0085]   if  $T_{分配} < k_{low} * T_{ctr}$ ,  $flag\_ T(n) = 0$  ,
           else  $flag\_ T(n) = flag\_ T(n-1)$ 
           if  $flag\_ \omega(n) = 0$  and  $flag\_ T(n) = 0$ ,  $flag(n) = 0$ 
[0086]   if  $flag\_ \omega(n) = 0$  and  $flag\_ T(n) = 1$ ,  $flag(n) = flag(n-1)$  ,
           if  $flag\_ \omega(n) = 1$  and  $flag\_ T(n) = 0$ ,  $flag(n) = 0$ 
           if  $flag\_ \omega(n) = 1$  and  $flag\_ T(n) = 1$ ,  $flag(n) = 1$ 

```

[0087] 若flag=1,防滑控制选择性接入单元3选择驱动防滑控制单元的控制力矩输出,若flag=0防滑控制选择性接入单元3选择电机力矩分配器2的分配力矩输出;

[0088] 其中, Δ 、 k_{up} 和 k_{low} 均为标定参数, ω 为实际轮速, v 为车速, r 为车轮滚动半径, $T_{分配}$ 为分配力矩, T_{ctr} 为控制力矩, n 表示第 n 个时刻, $flag_ \omega(n)$ 、 $flag_ T(n)$ 和 $flag(n)$ 分别为第 n 个时刻的角加速度标志位、力矩标志位和整体标志位, $flag_ T(n-1)$ 和 $flag(n-1)$ 表示第 $(n-1)$ 个时刻的角加速度标志位、力矩标志位和整体标志位。

[0089] 采用上述分布式驱动电动汽车路面自适应防滑控制系统的控制方法该方法包括如下步骤:

[0090] (1) 实时采集4个车轮的实际轮速 ω 、对应的驱动电机的转矩以及整车的车速 v ;

[0091] (2) 将采集的数据输入至非线性路面估计单元估计得到4个车轮对应的路面峰值附着系数;

[0092] (3) 在预先设置的路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图中查找得到与步骤(2)得到的路面峰值附着系数匹配的最优滑移率;

[0093] (4) 根据最优滑移率和车速 v 求取每个车轮对应的参考轮速 ω_r ;

[0094] (5) 将实际轮速 ω 和参考轮速 ω_r 的差值 $e = \omega - \omega_r$ 输入至预先设计的抗饱和积分滑模变结构控制器9得到控制力矩 T_{ctr} ;

[0095] (6) 根据控制力矩 T_{ctr} 和外部分配层电机力矩分配器2的分配力矩 $T_{分配}$ 选择性输入至电机控制器1进行4个车轮的驱动电机的控制。

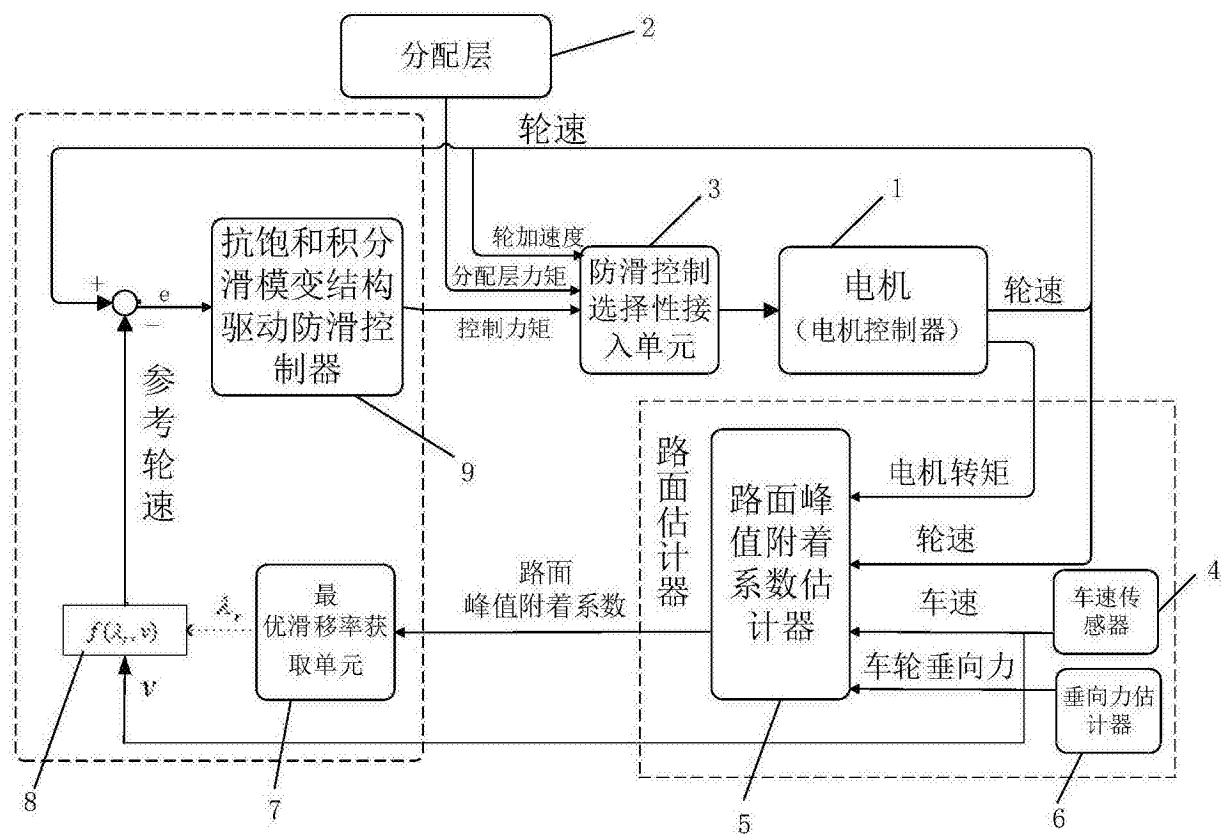


图1

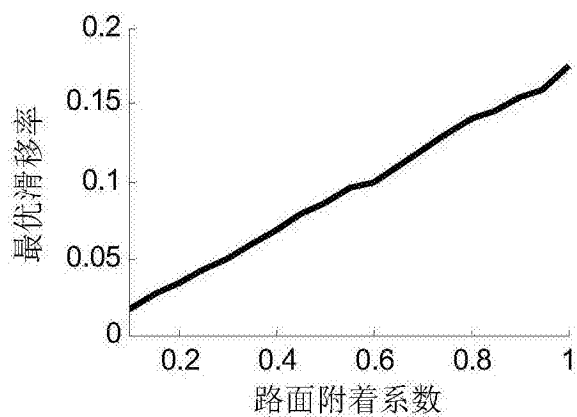


图2