



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110126640 A  
(43)申请公布日 2019.08.16

(21)申请号 201910418970.6

(22)申请日 2019.05.20

(71)申请人 苏亮

地址 361006 福建省厦门市思明区松岳里  
129号402室

(72)发明人 苏亮

(74)专利代理机构 厦门市新华专利商标代理有限公司 35203

代理人 朱凌

(51) Int. Cl.

B60L 15/20(2006.01)

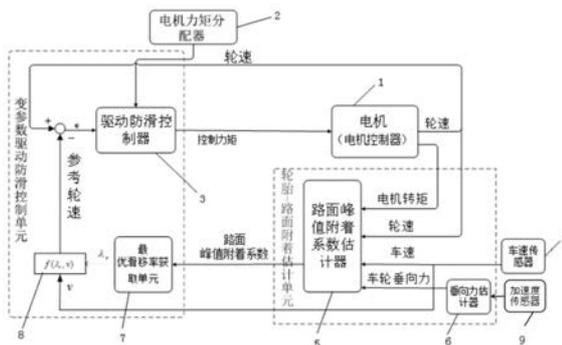
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统及方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统及方法,该系统包括电机控制器、车载传感器单元、轮胎-路面附着估计单元、变参数驱动防滑控制单元,轮胎-路面附着估计单元用于获取每个车轮的路面峰值附着系数,变参数驱动防滑控制单元根据轮胎-路面附着估计单元获取的车轮的路面峰值附着系数以及车载传感器单元的实测数据进行防滑控制输出控制力矩,电机控制器控制4个驱动电机运动。本发明驱动防滑控制可实时根据当前路面的估计结果自适应调节,控制精确性高,防滑效果好,可提高车辆安全性和驱动效率。



1. 一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,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个分别连接车轮的驱动电机,其特征在于:还包括车载传感器单元、轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,该变参数驱动防滑控制单元连接电机力矩分配器,获取4个驱动电机的分配力矩并发送给电机控制器,由电机控制器分别控制4个驱动电机运动;该车载传感器单元连接轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,该轮胎-路面附着估计单元根据车载传感器单元的实测数据动态获取每个车轮的路面峰值附着系数,并将其发送给变参数驱动防滑控制单元,该变参数驱动防滑控制单元根据该每个车轮的路面峰值附着系数和车载传感器单元的实测数据计算得到控制力矩,根据车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩给电机控制器,由电机控制器分别对4个驱动电机实施防滑控制。

2. 根据权利要求1所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于:所述的车载传感器单元包括用于测量车速的车速传感器、用于测量纵向、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和用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元。

3. 根据权利要求2所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于:该变参数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变参数驱动防滑控制器;该最优滑移率获取单元输入端连接轮胎-路面附着估计单元,以获取动态的每个车轮的路面峰值附着系数,该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变参数驱动防滑控制器输入端;该变参数驱动防滑控制器的输入端还连接电机力矩分配器;该最优滑移率获取单元中预置有路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图;该最优滑移率获取单元根据轮胎-路面附着估计单元发送过来的4个车轮的路面峰值附着系数在对比图查找对应的最优滑移率,并发送给参考轮速计算单元,该参考轮速计算单元根据该最优滑移率和从车速传感器实时获取的车速计算得到每个车轮的参考轮速,并将参考轮速提供给轮速差值计算单元,该轮速差值计算单元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计算差值,将该差值输入至变参数驱动防滑控制器得到控制力矩,结合车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩给电机控制器。

4. 根据权利要求3所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于所述的参考轮速计算单元具体为:

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

其中,  $\omega_r$  为参考轮速,  $\lambda_r$  为最优滑移率,  $v$  为车速,  $r$  为车轮滚动半径。

5. 根据权利要求3所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于所述的变参数驱动防滑控制器具体为:

$$u = K_p [e + 1/T_i \int edt + T_d de/dt]$$

$$K_p = K_{p0} \{1 + K_{p1} [1 - \exp(-e^2)]\},$$

$$K_i = K_{i0} [K_{i1} + K_{i2} \exp(-e^2)]$$

其中,  $K_p$ 和 $K_i$ 分别是误差比例项和积分增益函数,以Gauss函数为基础构成, $K_p$ 的宽度取为1,以保证在较大的范围内具有较大的比例增益; $K_i$ 的宽度取为1,在稳态值附近加大积分作用,使系统有较快的响应速度而且可以避免积分饱和; $e = \omega - \omega_r$ ,  $\omega$ 为实际轮速,  $\omega_r$ 为参考轮速; $K_{p0}$ ,  $K_{p1}$ ,  $K_{i0}$ ,  $K_{i1}$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 均为控制器参数,通过实车或仿真标定选取。

6. 根据权利要求2所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于:所述的轮胎-路面附着估计单元包括路面峰值附着系数估计器和垂向力估计器,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变参数驱动防滑控制单元,向其发送动态的每个车轮的路面峰值附着系数;加速度传感器还向垂向力估计器发送实测的纵向加速度和侧向加速度。

7. 根据权利要求6所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于所述的垂向力估计器具体为:

$$F_Z^{fl} = mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y$$

$$F_Z^{fr} = mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y$$

$$F_Z^{rl} = mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y$$

$$F_Z^{rr} = mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y$$

$F_Z^{fl}$ 、 $F_Z^{fr}$ 、 $F_Z^{rl}$ 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, $B_f$ 为前轮距, $B_r$ 为后轮距。

8. 根据权利要求6所述的一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,其特征在于所述的路面峰值附着系数估计器具体为:

$$\dot{z} = -\frac{k_1}{I} (T_m + r \hat{F}_x) + \frac{r F_z}{I} \frac{\partial \mu(\lambda, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} u_\theta(t)$$

$$\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \hat{\theta}) + \frac{I}{r} (z + k_1 \omega)$$

$$u_\theta(t) = \dot{\hat{\theta}} = \gamma (\theta^* - \hat{\theta})$$

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, $\lambda$ 为车轮滑移率, $\lambda = (\omega r - v) / v$ ,  $\omega$ 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,  $\theta^*$  为等式方程  $\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \theta)$  的数值解,  $k_1$  和  $\gamma$  为估计器设计参数,  $k_1$  和  $\gamma$  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,  $\theta$  为路面峰值附着系数,  $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  和  $\theta_5$  均为常参数,  $\exp$  为以自然常数  $e$  为底的指数函数,  $\operatorname{sgn}$  为符号函数。

9. 一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制方法, 其特征在于包括一变参数防滑控制系统, 该系统包括电机控制器、车载传感器单元、轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元, 所述的电机控制器设置4个分别连接车轮的驱动电机, 该车载传感器单元连接轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元, 所述的车载传感器单元包括用于测量车速的车速传感器、用于测量纵向、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和用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元; 该变参数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变参数驱动防滑控制器; 该最优滑移率获取单元中预置有路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图; 具体包括如下控制步骤:

步骤1、实时采集4个车轮的实际轮速  $\omega$ 、对应的驱动电机的转矩、整车的车速  $v$  和纵向、侧向加速度;

步骤2、将步骤1采集的数据输入至轮胎-路面附着估计单元估计得到4个车轮对应的路面峰值附着系数;

步骤3、在最优滑移率获取单元预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;

步骤4、该参考轮速计算单元根据最优滑移率和实测的车速  $v$  求取每个车轮对应的参考轮速  $\omega_r$ ;

步骤5、该轮速差值计算单元将实际轮速  $\omega$  和参考轮速  $\omega_r$  的差值  $e = \omega - \omega_r$  输入至变参数驱动防滑控制器得到控制力矩;

步骤6、该变参数驱动防滑控制器根据车轮滑移率控制范围要求, 判断是否需要进行驱动防滑控制, 若需要, 则输出控制力矩给电机控制器, 由电机控制器分别对4个驱动电机实施防滑控制。

## 一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数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车防滑控制系统及方法,尤其是一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数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,从而将滑移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控制可以将滑移率控制到设定值,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解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数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] 一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,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个分别连接车轮的驱动电机,其特征在于:还包括车载传感器单元、轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,该变参数驱动防滑控制单元连接电机力矩分配器,获取4个驱动电机的分配力矩并发送给电机控制器,由电机控制器分别控制4个驱动电机运动;该车载传感器单元连接轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,该轮胎-路面附着估计单元根据车载传感器单元的实测数据动态

获取每个车轮的路面峰值附着系数,并将其发送给变参数驱动防滑控制单元,该变参数驱动防滑控制单元根据该每个车轮的路面峰值附着系数和车载传感器单元的实测数据计算得到控制力矩,根据车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩给电机控制器,由电机控制器分别对4个驱动电机实施防滑控制。

[0012] 所述的车载传感器单元包括用于测量车速的车速传感器、用于测量纵向、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和用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元。

[0013] 该变参数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变参数驱动防滑控制器;该最优滑移率获取单元输入端连接轮胎-路面附着估计单元,以获取动态的每个车轮的路面峰值附着系数,该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变参数驱动防滑控制器输入端;该变参数驱动防滑控制器的输入端还连接电机力矩分配器;该最优滑移率获取单元中预置有路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图;该最优滑移率获取单元根据轮胎-路面附着估计单元发送过来的4个车轮的路面峰值附着系数在对比图查找对应的最优滑移率,并发送给参考轮速计算单元,该参考轮速计算单元根据该最优滑移率和从车速传感器实时获取的车速计算得到每个车轮的参考轮速,并将参考轮速提供给轮速差值计算单元,该轮速差值计算单元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计算差值,将该差值输入至变参数驱动防滑控制器得到控制力矩,结合车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩给电机控制器。

[0014] 所述的参考轮速计算单元具体为:

$$[0015] \quad \omega_r = \frac{\lambda_r v + v}{r},$$

[0016] 其中, $\omega_r$ 为参考轮速, $\lambda_r$ 为最优滑移率, $v$ 为车速, $r$ 为车轮滚动半径。

[0017] 所述的变参数驱动防滑控制器具体为:

$$u = K_p [e + 1/T_i \int e dt + T_d de/dt]$$

$$[0018] \quad K_p = K_{p0} \{1 + K_{p1} [1 - \exp(-e^2)]\},$$

$$K_i = K_{i0} [K_{i1} + K_{i2} \exp(-e^2)]$$

[0019] 其中, $K_p$ 和 $K_i$ 分别是误差比例项和积分增益函数,以Gauss函数为基础构成, $K_p$ 的宽度取为1,以保证在较大的范围内具有较大的比例增益; $K_i$ 的宽度取为1,在稳态值附近加大积分作用,使系统有较快的响应速度而且可以避免积分饱和; $e = \omega - \omega_r$ , $\omega$ 为实际轮速, $\omega_r$ 为参考轮速; $K_{p0}$ , $K_{p1}$ , $K_{i0}$ , $K_{i1}$ , $T_i$ , $T_d$ 均为控制器参数,通过实车或仿真标定选取。

[0020] 所述的轮胎-路面附着估计单元包括路面峰值附着系数估计器和垂向力估计器,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变参数驱动防滑控制单元,向其发送动态的每个车轮的路面峰值附着系数;加速度传感器还向垂向力估计器发送实测的纵向加速度和侧向加速度。

[0021] 所述的垂向力估计器具体为:

$$F_z^{fl} = mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y$$

$$F_z^{fr} = mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_f l} a_y$$

[0022]

$$F_z^{rl} = mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y$$

$$F_z^{rr} = mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y$$

[0023]  $F_z^{fl}$ 、 $F_z^{fr}$ 、 $F_z^{rl}$ 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, $B_f$ 为前轮距, $B_r$ 为后轮距。

[0024] 所述的路面峰值附着系数估计器具体为:

$$\dot{z} = -\frac{k_1}{I}(T_m + r\hat{F}_x) + \frac{rF_z}{I} \frac{\partial \mu(\lambda, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} u_\theta(t)$$

[0025]

$$\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \hat{\theta}) + \frac{I}{r}(z + k_1 \omega)$$

$$u_\theta(t) = \dot{\hat{\theta}} = \gamma(\theta^* - \hat{\theta})$$

[0026] 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, $\lambda$ 为车轮滑移率, $\lambda = (\omega r - v) / v$ , $\omega$ 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, $\theta^*$ 为等式方程 $\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \theta)$ 的数值解, $k_1$ 和 $\gamma$ 为估计器设计参数, $k_1$ 和 $\gamma$ 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:

$$[0027] \quad \mu(\lambda, \theta) = \theta - \theta \exp\left[-\frac{\theta_2}{\theta}(\lambda + \theta_5 \lambda^2)\right] - \theta_3 \lambda \operatorname{sgn}(\lambda) + \theta_4 \lambda^2,$$

[0028] 其中, $\theta$ 为路面峰值附着系数, $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 和 $\theta_5$ 均为常参数, $\exp$ 为以自然常数e为底的指数函数, $\operatorname{sgn}$ 为符号函数。

[0029] 一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制方法,包括一变参数防滑控制系统,该系统包括电机控制器、车载传感器单元、轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,所述的电机控制器设置4个分别连接车轮的驱动电机,该车载传感器单元连接轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,所述的车载传感器单元包括用于测量车速的车速传感器、用于测量纵向、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和用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元;该变参数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变参数驱动防滑控制器;该最优滑移率获取单元中预置有路面峰值附着系数与最优滑移率一一

对应的对比图;具体包括如下控制步骤:

[0030] 步骤1、实时采集4个车轮的实际轮速 $\omega$ 、对应的驱动电机的转矩、整车的车速 $v$ 和纵向、侧向加速度;

[0031] 步骤2、将步骤1采集的数据输入至轮胎-路面附着估计单元估计得到4个车轮对应的路面峰值附着系数;

[0032] 步骤3、在最优滑移率获取单元预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;

[0033] 步骤4、该参考轮速计算单元根据最优滑移率和实测的车速 $v$ 求取每个车轮对应的参考轮速 $\omega_r$ ;

[0034] 步骤5、该轮速差值计算单元将实际轮速 $\omega$ 和参考轮速 $\omega_r$ 的差值 $e = \omega - \omega_r$ 输入至变参数驱动防滑控制器得到控制力矩;

[0035] 步骤6、该变参数驱动防滑控制器根据车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要进行驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩给电机控制器,由电机控制器分别对4个驱动电机实施防滑控制。

[0036] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0037] (1) 本发明变参数驱动防滑控制器中采用了变参数PI控制器,以Gauss函数为基础构成,通过引入非线性函数可以根据偏差的大小在线调节以提高控制性能,将 $K_p$ 的宽度取为1,以保证在较大的范围内具有较大的比例增益;将 $K_i$ 的宽度取为1,在稳态值附近加大积分作用,使系统有较快的响应速度而且可以避免积分饱和,保证控制器的控制精确性,提高防滑控制效果。

[0038] (2) 本发明结合车轮动力学,设计了轮胎-路面附着估计单元,通过采集车辆运行过程中的状态实时获取最优滑移率,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

[0039] 图1为本发明四轮驱动电动车路面自适应的防滑控制系统的结构框图;

[0040] 图2为本发明路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图。

[0041] 图中,1为电机控制器,2为电机力矩分配器,3为变参数驱动防滑控制器,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为加速度传感器。

[0042] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

## 具体实施方式

[0043] 如图1所示,一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统,包括电机控制器1、电机力矩分配器2、车载传感器单元、轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,该电机控制器1设置4个分别连接车轮的驱动电机,该变参数驱动防滑控制单元连接电机力矩分配器2,获取4个驱动电机的分配力矩发送给电机控制器1,由电机控制器1分别控制4个驱动电机运动;该车载传感器单元连接轮胎-路面附着估计单元和变参数驱动防滑控制单元,该轮胎-路面附着估计单元用于获取每个车轮的路面峰值附着系数,轮

胎-路面附着估计单元连接变参数驱动防滑控制单元,该变参数驱动防滑控制单元根据轮胎-路面附着估计单元获取的每个车轮的路面峰值附着系数和车载传感器单元的实测数据计算得到控制力矩,根据车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩给电机控制器1,由电机控制器1分别对4个驱动电机实施防滑控制。

[0044] 所述的车载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9、用于获取4个车轮实际轮速的轮速获取子单元和用于获取4个驱动电机转矩的转矩获取子单元,该车速传感器4、加速度传感器9、轮速获取子单元和转矩获取子单元均连接至轮胎-路面附着估计单元,车速传感器4和轮速获取子单元还连接至变参数驱动防滑控制单元。

[0045] 所述的轮胎-路面附着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输出端连接变参数驱动防滑控制单元,向其发送动态的每个车轮的路面峰值附着系数;加速度传感器还向垂向力估计器6发送实测的纵向加速度和侧向加速度。

[0046] 该垂向力估计器6具体由如下公式表示:

$$\begin{aligned}
 F_z^{fl} &= mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y \\
 F_z^{fr} &= mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_f l} a_y \\
 F_z^{rl} &= mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y \\
 F_z^{rr} &= mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y
 \end{aligned} \quad (1)$$

[0048] 其中,  $F_z^{fl}$ 、 $F_z^{fr}$ 、 $F_z^{rl}$ 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、 $B_f$ 为前轮距、 $B_r$ 为后轮距。

[0049] 该路面峰值附着系数估计器5具体由如下公式表示:

$$\begin{aligned}
 \dot{z} &= -\frac{k_1}{I}(T_m + r\hat{F}_x) + \frac{rF_z}{I} \frac{\partial \mu(\lambda, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} u_\theta(t) \\
 \hat{F}_x &= F_z \mu(\lambda, \hat{\theta}) + \frac{I}{r}(z + k_1 \omega) \\
 u_\theta(t) &= \dot{\hat{\theta}} = \gamma(\theta^* - \hat{\theta})
 \end{aligned} \quad (2)$$

[0051] 其中,z为中间变量, $\dot{z}$ 表示对z求一阶导数,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, $\dot{\hat{\theta}}$ 表示对 $\hat{\theta}$ 求一阶导数, $\lambda$ 为车轮滑移率, $\lambda = (\omega r - v)/v$ , $\omega$ 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, $\theta^*$ 为等式方程 $\hat{F}_x = F_z \mu(\lambda, \theta)$ 的

数值解,  $k_1$  和  $\gamma$  为估计器设计参数,  $k_1$  和  $\gamma$  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。

[0052] 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:

$$[0053] \quad \mu(\lambda) = c_1 [1 - \exp(-c_2 \lambda)] - c_3 \lambda \quad (3)$$

[0054] 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 ( $\lambda$  为车轮滑移率), 将轮胎模型参数从三个增加到五个, 采用改进的Burckhardt轮胎模型  $\mu(\lambda, \theta)$ :

$$[0055] \quad \mu(\lambda, \theta) = \theta - \theta \exp\left[-\frac{\theta_2}{\theta}(\lambda + \theta_5 \lambda^2)\right] - \theta_3 \lambda \operatorname{sgn}(\lambda) + \theta_4 \lambda^2 \quad (4)$$

[0056] 其中,  $\theta$  为路面峰值附着系数,  $\theta_2, \theta_3, \theta_4$  和  $\theta_5$  均为常参数,  $\exp$  为以自然常数  $e$  为底的指数函数,  $\operatorname{sgn}$  为符号函数。

[0057] 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  $\lambda$  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:

$$[0058] \quad \dot{\hat{\theta}} = \begin{cases} \gamma(\theta^* - \hat{\theta}) & \lambda \geq \varepsilon \hat{\lambda}_{opt} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

[0059] 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。

[0060] 该变参数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变参数驱动防滑控制器3; 该最优滑移率获取单元7输入端连接轮胎-路面附着估计单元的路面峰值附着系数估计器5, 以获取动态的每个车轮的路面峰值附着系数, 该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变参数驱动防滑控制器3输入端; 该变参数驱动防滑控制器3的输入端还连接电机力矩分配器2, 以获取电机力矩分配器2给出的4个驱动电机的分配力矩, 由电机控制器1分别控制4个驱动电机运动; 该最优滑移率获取单元7中预置有路面峰值附着系数与最优滑移率一一对应的对比图; 该最优滑移率获取单元7根据轮胎-路面附着估计单元发送过来的4个车轮的路面峰值附着系数在对比图查找对应的最优滑移率, 并发送给参考轮速计算单元8, 该参考轮速计算单元8根据该最优滑移率和从车速传感器4实时获取的车速计算得到每个车轮的参考轮速, 并将参考轮速提供给轮速差值计算单元, 该轮速差值计算单元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计算的参考轮速计算差值, 将该差值输入至变参数驱动防滑控制器3得到控制力矩, 结合车轮滑移率控制范围要求, 判断是否需要驱动防滑控制, 若需要, 则输出控制力矩给电机控制器1, 由电机控制器1分别对4个驱动电机实施防滑控制。

[0061] 该最优滑移率获取单元7根据轮胎-路面附着估计单元输出的路面峰值附着系数更新结果,对最优滑移率进行修正,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:

[0062] 利用改进的Burckhardt轮胎模型,对滑移率求导,得到:

$$[0063] \quad \frac{d\mu}{d\lambda} = -\hat{\theta} \exp\left[-\frac{\theta_2}{\hat{\theta}}(\lambda + \theta_5 \lambda^2)\right] * \left[-\frac{\theta_2}{\hat{\theta}}(1 + 2\theta_5 \lambda)\right] - \theta_3 + 2\theta_4 \lambda \quad (6)$$

[0064] 此式为0时的 $\lambda$ 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。

[0065] 该参考轮速计算单元8具体为:

$$[0066] \quad \omega_r = \frac{\lambda_r v + v}{r} \quad (7)$$

[0067] 其中, $\omega_r$ 为参考轮速, $\lambda_r$ 为最优滑移率, $v$ 为车速, $r$ 为车轮滚动半径。

[0068] 该变参数驱动防滑控制器3具体为:

$$u = K_p [e + 1/T_i \int edt + T_d de/dt]$$

$$[0069] \quad K_p = K_{p0} \{1 + K_{p1} [1 - \exp(-e^2)]\} \quad (8)$$

$$K_i = K_{i0} [K_{i1} + K_{i2} \exp(-e^2)]$$

[0070] 其中, $K_p$ 和 $K_i$ 分别是误差比例项和积分增益函数,以Gauss函数为基础构成,通过引入非线性函数可以根据偏差的大小在线调节以提高控制性能。 $K_p$ 的宽度取为1,以保证在较大的范围内具有较大的比例增益; $K_i$ 的宽度取为1,在稳态值附近加大积分作用,使系统有较快的响应速度而且可以避免积分饱和; $e = \omega - \omega_r$ , $\omega$ 为实际轮速, $\omega_r$ 为参考轮速; $K_{p0}$ , $K_{p1}$ , $K_{i0}$ , $K_{i1}$ , $T_i$ , $T_d$ 均为控制器参数,通过实车或仿真标定选取。

[0071] 采用上述一种基于路面自适应的四轮驱动电动车变参数防滑控制系统的控制方法,包括如下步骤:

[0072] 步骤1、实时采集4个车轮的实际轮速 $\omega$ 、对应的驱动电机的转矩、整车的车速 $v$ 和纵向、侧向加速度;

[0073] 步骤2、将步骤1采集的数据输入至轮胎-路面附着估计单元估计得到4个车轮对应的路面峰值附着系数;

[0074] 步骤3、在预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;

[0075] 步骤4、根据最优滑移率和实测的车速 $v$ 求取每个车轮对应的参考轮速 $\omega_r$ ;

[0076] 步骤5、将实际轮速 $\omega$ 和参考轮速 $\omega_r$ 的差值 $e = \omega - \omega_r$ 输入至变参数驱动防滑控制器3得到控制力矩 $T_{ctr}$ ;

[0077] 步骤6、变参数驱动防滑控制器3根据车轮滑移率控制范围要求,判断是否需要进行驱动防滑控制,若需要,则输出控制力矩 $T_{ctr}$ 给电机控制器1,由电机控制器1分别对4个驱动电机实施防滑控制。

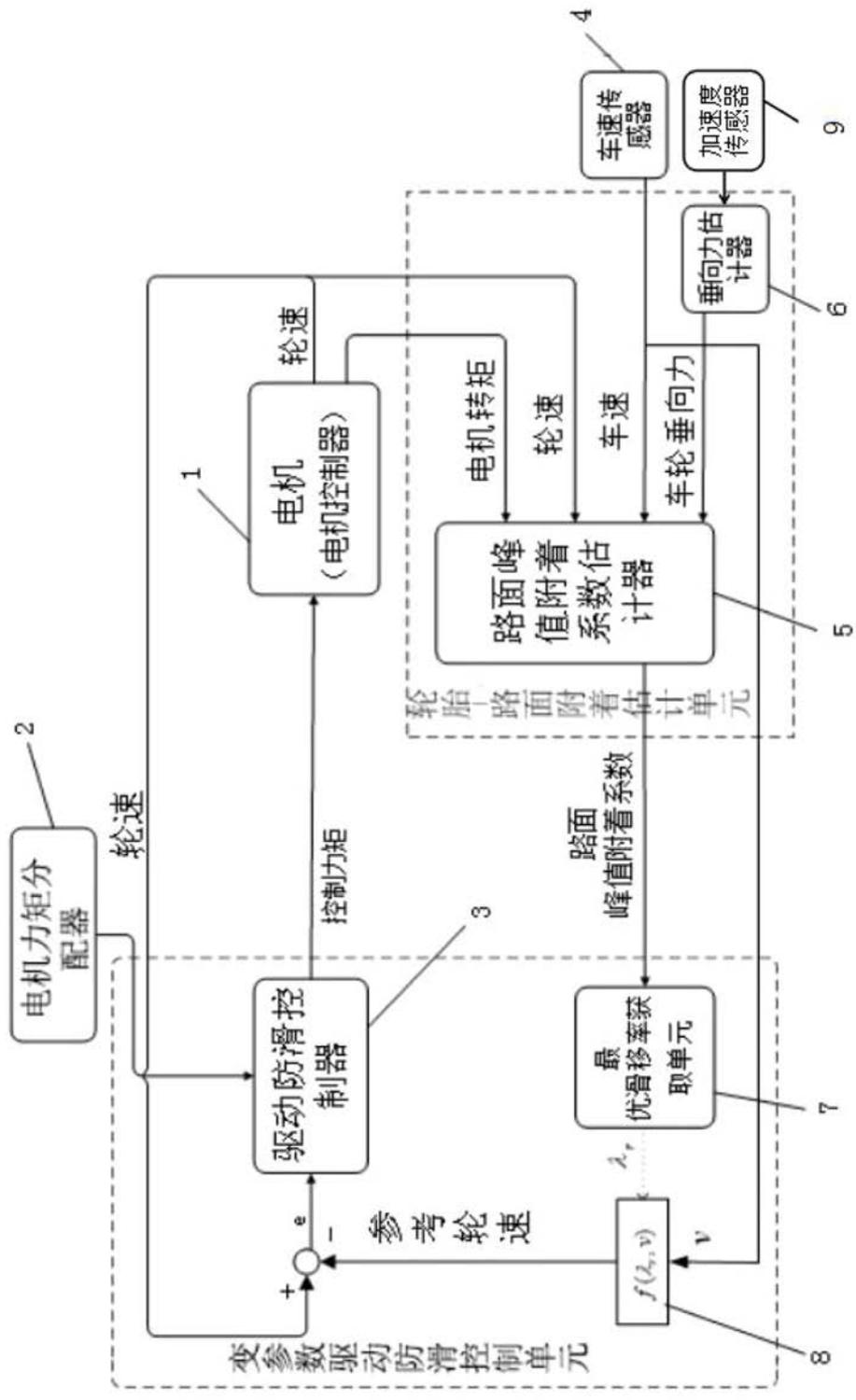


图1

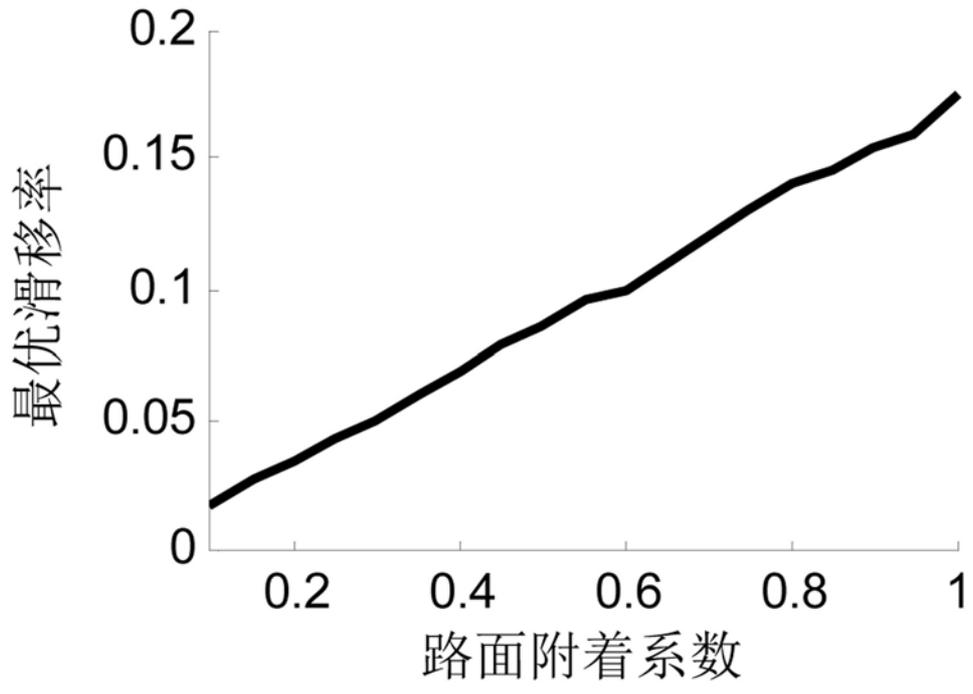


图2