



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110884363 B

(45) 授权公告日 2022. 08. 23

(21) 申请号 201911255196.8

CN 109572447 A, 2019.04.05

(22) 申请日 2019.12.09

CN 109606133 A, 2019.04.12

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 106985703 A, 2017.07.28

申请公布号 CN 110884363 A

US 2018236989 A1, 2018.08.23

(43) 申请公布日 2020.03.17

KR 20080008712 A, 2008.01.24

(73) 专利权人 吉林大学

赵健. 基于路面识别的汽车驱动力模糊滑模控制.《吉林大学学报(工学版)》.2015, 第45卷(第4期),

地址 130012 吉林省长春市前进大街2699号

Sudipta Saha. A robust slip based traction control of electric vehicle under different road condition.《Michael Faraday IET International Summit 2015》.2015,

(72) 发明人 曾小华 李量宇 宋大凤 钱琦峰 曾繁勇

胡耀华等. 永磁同步电机改进型指数趋近率滑模控制.《微电机》.2012, (第08期),

(74) 专利代理机构 长春市恒誉专利代理事务所(普通合伙) 22212

蒋智通. 低附着条件下四轮驱动电动汽车动力学控制.《工程科技II辑》.2019, (续)

专利代理师 李荣武

审查员 陈江兰

(51) Int. Cl.

B60L 15/20 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101786452 A, 2010.07.28

CN 101786452 A, 2010.07.28

权利要求书4页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

定性和起步加速能力。

一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法

(57) 摘要

本发明提出一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法,旨在解决现有技术中存在的路面适应性差、控制算法单一、依赖整车参数过多、控制鲁棒性差等缺点,属于汽车控制系统。本方法根据车轮实时滑转率和两侧车轮实时滑转率差值判断车辆处于对开路面或均一低附着系数路面;采用制动力逻辑门限控制对处于对开路面的滑转车轮进行制动干预;采用初始制动方式进一步判断均一低附着系数路面下滑转车轮所处路面类型,并采用滑模变结构控制调整滑转车轮驱动转矩。本发明的优点是能够以标准路面数据为基础,实时判别路面类型,采用不同控制算法控制车轮滑转率在最优值附近,增加驱动防滑控制系统的路面适应性,提高车辆动力性、侧向稳



CN 110884363 B

[接上页]

(56) 对比文件

刘栋等. 基于滑模变结构控制的多轮独立电  
驱动车辆驱动防滑控.《现代制造技术与装备》

.2017, (第11期),

段敏等. 基于路面识别的电动汽车驱动防滑  
控制策略研究.《机电工程》.2015, (第09期),

1. 一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法,其特征在于,包括下列步骤:

第一步,计算车轮实时滑转率和利用附着系数;

以电驱动桥为研究对象,由一个驱动电机驱动左右两侧车轮;驱动过程中车轮实时滑转率由式(1)计算:

$$\lambda_i = 1 - \frac{V}{W_i R} \quad (1)$$

式中: $\lambda_i$ ——车轮实时滑转率, $i=1,r$ ,分别表示左侧车轮和右侧车轮;

$V$ ——车速

$W_i$ ——车轮转速

$R$ ——车轮半径

车轮利用附着系数由式(2)计算:

$$\mu_i = \frac{F_{xi}}{F_{zi}} \quad (2)$$

式中: $\mu_i$ ——利用附着系数

$F_{xi}$ ——车轮纵向驱动力

$F_{zi}$ ——车轮垂向载荷

第二步,判断路面类型;

给定车轮滑转率阈值和两侧车轮滑转率差值阈值,如果任一侧车轮实时滑转率大于滑转率阈值且两侧车轮滑转率差值小于滑转率差值阈值,则判断此时路况为均一低附着系数路面;如果任一侧车轮实时滑转率大于滑转率阈值且两侧车轮滑转率差值大于滑转率差值阈值,则判断此时路况为对开路面;

当判断车轮处于均一低附着系数路面时,记录此时刻 $t_1$ 及对应的车速值 $V_1$ ,并对发生滑转的车轮进行初始制动控制,当车轮轮速降至所设定的轮速阈值以下时,解除初始制动控制并记录此时刻 $t_2$ 及对应的车速值 $V_2$ ;

由式(3)计算在 $t_1-t_2$ 时间段内车辆的平均加速度 $a$ :

$$a = \frac{V_1 - V_2}{t_1 - t_2} \quad (3)$$

将计算得到的平均加速度值与预存的路面标准数据进行对比,确定车轮所处路面类型和路面参数值;

第三步,滑模变结构驱动防滑控制器设计;

当判断车轮处于均一低附着系数路面时,启动滑模变结构驱动防滑控制;

定义 $\lambda$ 作为控制系统的状态变量,对(1)式求导可得式(4):

$$\dot{\lambda} = \frac{V\dot{W}}{RW^2} - \frac{\dot{V}}{RW} \quad (4)$$

式中: $\lambda = \frac{\lambda_l + \lambda_r}{2}$ ——左右车轮平均滑转率

$W = \frac{W_l + W_r}{2}$ ——左右车轮平均转速

忽略驱动过程中车轮的滚动阻力和车辆所受空气阻力,车轮动力学方程可由式(5)、(6)计算:

$$J\dot{W} = T - F_x R \quad (5)$$

$$F_x = M\dot{V} \quad (6)$$

式中:J——车轮转动惯量

$$T = \frac{T_l + T_r}{2} \text{——左右车轮所受平均驱动转矩}$$

$$F_x = \frac{F_{xl} + F_{xr}}{2} \text{——左右车轮所受平均纵向驱动力}$$

$$M = \frac{M_l + M_r}{2} \text{——左右车轮平均簧载质量}$$

驱动工况下车轮纵向驱动力与垂直载荷关系由式(2)计算,将式(2)、(5)、(6)带入式(4)中得:

$$\dot{\lambda} = \frac{VT}{RJW^2} - \frac{\mu F_z}{RMW} - \frac{V\mu F_z}{JW^2} \quad (7)$$

$$\text{式中: } \mu = \frac{\mu_l + \mu_r}{2} \text{——左右车轮平均利用附着系数}$$

$$F_z = \frac{F_{zl} + F_{zr}}{2} \text{——左右车轮所受平均垂直载荷}$$

根据所述第二步中确定的车轮所处路面类型,可得到路面最优滑转率,并以最优滑转率为分界点,将附着系数与滑转率定义为分段近似线性关系,如式(8)所示:

$$\mu(\lambda) = \begin{cases} K_1 \lambda, & \lambda < \lambda_t \\ \mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t), & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\lambda_t$ ——最优滑转率

$\mu_{\max}$ ——最优滑转率对应的路面最大附着系数

$K_1$ 、 $K_2$ ——两段线性关系的斜率绝对值

将式(8)带入式(7)得:

$$\dot{\lambda} = \begin{cases} \frac{VT}{RJW^2} - \frac{K_1 \lambda F_z}{RMW} - \frac{K_1 \lambda F_z V}{JW^2}, & \lambda < \lambda_t \\ \frac{VT}{RJW^2} - \frac{(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t)) F_z}{RMW} - \frac{(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t)) F_z V}{JW^2}, & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (9)$$

选取滑模变结构控制器切换函数如式(10):

$$s = \lambda - \lambda_t \quad (10)$$

选择改进型指数趋近律如式(11):

$$\dot{s} = -\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (11)$$

式中: $\varepsilon > 0$ 、 $k > 0$ 均为系数,根据具体控制系统选取;

将式(10)带入式(11)可得:

$$-\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) - ks = \dot{\lambda} - \dot{\lambda}_t \quad (12)$$

将式(12)带入式(9)可得滑模变结构控制器的控制律,如式(13)所示:

$$T = \begin{cases} RK_1 \lambda F_z + \frac{JWK_1 \lambda F_z}{MV} - \frac{RJW^2}{V} (\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) + ks), & \lambda < \lambda_t \\ R(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t)) F_z + \frac{JW(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t)) F_z}{MV} - \frac{RJW^2}{V} (\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) + ks), & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (13)$$

第四步,制动力逻辑门限控制器设计;

当判断车轮处于对开路面时,对发生滑转侧车轮启动制动力逻辑门限控制;

采用滑转率和车轮角加速度两个门限值控制液压制动系统状态;

液压制动系统状态包括增压、保压、降压三个基本状态,其中保压为默认初始状态;

当前状态为增压状态时,无条件执行连续增压指令,当车轮滑转率降到最优滑转率以下时,由增压状态跳变到保压状态;

当前状态为保压状态时,无条件执行连续保压指令,当车轮滑转率大于最优滑转率且车轮角加速度大于零时,由保压状态跳变到增压状态,当车轮滑转率小于最优滑转率且车轮角加速度小于零时,由保压状态跳变到减压状态;

当前状态为减压状态时,无条件执行连续减压指令,当车轮角加速度大于零时,由减压状态跳变到保压状态。

2. 根据权利要求1所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法,其特征在于,第二步中,所述预存的路面标准数据通过反复试验测得,存储在控制器中。

3. 根据权利要求1所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法,其特征在于,第二步中,所述路面参数是指路面附着系数与滑转率分段近似线性关系中两段线性关系下的斜率绝对值 $K_1$ 、 $K_2$ ,最优滑转率 $\lambda_t$ 和最优滑转率对应的路面最大附着系数 $\mu_{\max}$ ;

利用Burckhardt  $u$ - $\lambda$ 标准路面模型计算得到驱动工况下纵向附着系数与滑转率关系,如式(14)所示:

$$u(\lambda) = C_1 * (1 - e^{-C_2 \lambda}) - C_3 \lambda \quad (14)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为不同路面的拟合参数,通过实验统计数据获得;

将式(14)求导并令其为零,可得路面最优滑转率和最大附着系数,如式(15)、(16)所示:

$$\lambda_t = \frac{1}{C_2} \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \quad (15)$$

$$\mu_{\max} = C_1 - \frac{C_3}{C_2} (1 + \ln \frac{C_1 C_2}{C_3}) \quad (16)$$

将路面状况分为极低附着系数路面、低附着系数路面、中低附着系数路面、中高附着系数路面和高附着系数路面,并将各路面对应的 $\lambda_t$ 、 $\mu_{\max}$ 储存在控制器中;

路面附着系数与滑转率分段近似线性关系中两段线性关系下的斜率绝对值 $K_1$ 、 $K_2$ 分别由式(17)、(18)计算:

$$K_1 = \left| \frac{\mu_{\max}}{\lambda_t} \right| \quad (17)$$

$$K_2 = \left| \frac{\mu_{\max} - \mu_l}{\lambda_l - 1} \right| \quad (18)$$

式中： $\mu_1$ ——滑转率为1时对应的路面附着系数，利用式(14)计算得到。

4. 根据权利要求1所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法，其特征在于，第四步中，所述液压制动系统的默认初始状态是指制动力逻辑门限控制启动时的状态。

## 一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于汽车控制系统,具体涉及一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着新能源汽车保有量的日益增长和汽车智能化技术的发展,对应用于新能源汽车中的控制系统提出了更高要求。电驱动桥作为新能源汽车中的一种重要结构形式,以驱动电机为动力源驱动车轮,省去传统汽车中离合器等复杂机械结构,提高了传动效率和动力响应能力。驱动防滑控制系统作为汽车驱动安全技术领域的核心技术之一,主要通过控制车轮的滑转情况,保证汽车获得较大的牵引力和侧向力,尤其是在冰、雪等低附着系数路面上进行起步、加速时,通过对车轮滑转率的实时调节,防止车轮过度滑转,保证汽车的动力性和行驶稳定性。本发明根据汽车电驱动桥两侧车轮的实时滑转情况,提出一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法,通过判别车辆所处路面类型,采用不同控制算法将车轮滑转率控制在最优值附近,从而增加车辆驱动防滑控制系统的路面适应性,进一步提高车辆动力性、侧向稳定性和起步加速能力。

[0003] 目前,日本、欧美等一些高校和企业如日本东京大学、日本横滨国立大学、美国 Daimler-Chrysler 公司等相继对电动汽车的驱动防滑做了有关研究,部分已应用于实车。而近几年,为充分提高新能源汽车领域的动力性和行驶安全性,国内一些学者也对电动汽车驱动防滑控制系统展开了相关研究。如中国专利公布号为 CN109515206A,公布日为 2019-03-26,公开了一种电动车辆的驱动防滑控制方法。该控制方法通过比较车轮实时滑转率与滑转率预设值作为电机转矩控制条件,控制过程简单易行,但该专利没有充分考虑不同附着系数路面对车轮最优滑转率的影响,缺乏对不同道路的适应能力。中国专利公布号为 CN109017449A,公布日为 2018-12-18,公开了一种纯电动车的驱动防滑控制方法及系统。该方法利用整车动力学方程和汽车在良好路面下电机转速变化率的实测数据推导出电机转速变化率和电机输出转矩等变量的函数关系,有效地适应了不同车型的开放和使用,但该控制方法涉及多个整车参数,因此受整车状态影响较大,模型复杂鲁棒性差。本发明以预存的标准路面类型数据为基础,通过车轮滑转率等变量判断车辆所处路面类型,并结合车轮滑转率与附着系数的关系曲线,控制不同路况下车轮地面附着力在最大值附近。

### 发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是克服现有电驱动桥驱动防滑控制系统中存在的路面适应性差、控制算法单一、依赖整车参数过多、控制鲁棒性差等问题,提供一种应用于汽车电驱动桥的控制算法简便、路况适应性良好的驱动防滑控制方法。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明是采用如下技术方案实现的:包括下列步骤:

[0006] 第一步,计算车轮实时滑转率和利用附着系数;

[0007] 本发明研究对象为电驱动桥,由一个驱动电机驱动左右两侧车轮;驱动过程中车

轮实时滑转率由式(1)计算:

$$[0008] \quad \lambda_i = 1 - \frac{V}{W_i R} \quad (1)$$

[0009] 式中: $\lambda_i$ ——车轮实时滑转率, $i=1,r$ ,分别表示左侧车轮和右侧车轮;

[0010]  $V$ ——车速

[0011]  $W_i$ ——车轮转速

[0012]  $R$ ——车轮半径

[0013] 车轮利用附着系数由式(2)计算:

$$[0014] \quad \mu_i = \frac{F_{xi}}{F_{zi}} \quad (2)$$

[0015] 式中: $\mu_i$ ——利用附着系数

[0016]  $F_{xi}$ ——车轮纵向驱动力

[0017]  $F_{zi}$ ——车轮垂向载荷

[0018] 第二步,判断路面类型;

[0019] 给定车轮滑转率阈值和两侧车轮滑转率差值阈值,如果任一侧车轮实时滑转率大于滑转率阈值且两侧车轮滑转率差值小于滑转率差值阈值,则判断此时路况为均一低附着系数路面;如果任一侧车轮实时滑转率大于滑转率阈值且两侧车轮滑转率差值大于滑转率差值阈值,则判断此时路况为对开路面;

[0020] 当判断车轮处于均一低附着系数路面时,记录此时刻 $t_1$ 及对应的车速值 $V_1$ ,并对发生滑转的车轮进行初始制动控制,当车轮轮速降至所设定的轮速阈值以下时,解除初始制动控制并记录此时刻 $t_2$ 及对应的车速值 $V_2$ ;

[0021] 由式(3)计算在 $t_1-t_2$ 时间段内车辆的平均加速度 $a$ :

$$[0022] \quad a = \frac{V_1 - V_2}{t_1 - t_2} \quad (3)$$

[0023] 将计算得到的平均加速度值与预存的路面标准数据进行对比,确定车轮所处路面类型和路面参数值;

[0024] 第三步,滑模变结构驱动防滑控制器设计;

[0025] 当判断车轮处于均一低附着系数路面时,启动滑模变结构驱动防滑控制;

[0026] 定义 $\lambda$ 作为控制系统的状态变量,对(1)式求导可得式(4):

$$[0027] \quad \dot{\lambda} = \frac{V \dot{W}}{RW^2} - \frac{\dot{V}}{RW} \quad (4)$$

[0028] 式中: $\lambda = \frac{\lambda_l + \lambda_r}{2}$ ——左右车轮平均滑转率

[0029]  $W = \frac{W_l + W_r}{2}$ ——左右车轮平均转速

[0030] 忽略驱动过程中车轮的滚动阻力和车辆所受空气阻力,车轮动力学方程可由式(5)、(6)计算:

[0031]  $J\dot{W} = T - F_x R$  (5)

[0032]  $F_x = M\dot{V}$  (6)

[0033] 式中: J——车轮转动惯量

[0034]  $T = \frac{T_l + T_r}{2}$ ——左右车轮所受平均驱动转矩

[0035]  $F_x = \frac{F_{xl} + F_{xr}}{2}$ ——左右车轮所受平均纵向驱动力

[0036]  $M = \frac{M_l + M_r}{2}$ ——左右车轮平均簧载质量

[0037] 驱动工况下车轮纵向驱动力与垂直载荷关系由式(2)计算,将式(2)、(5)、(6)带入式(4)中得:

[0038]  $\dot{\lambda} = \frac{VT}{RJW^2} - \frac{\mu F_z}{RMW} - \frac{V\mu F_z}{JW^2}$  (7)

[0039] 式中:  $\mu = \frac{\mu_l + \mu_r}{2}$ ——左右车轮平均利用附着系数

[0040]  $F_z = \frac{F_{zl} + F_{zr}}{2}$ ——左右车轮所受平均垂直载荷

[0041] 根据所述第二步中确定的车轮所处路面类型,可得到路面最优滑转率,并以最优滑转率为分界点,将附着系数与滑转率定义为分段近似线性关系,如式(8)所示:

[0042] 
$$\mu(\lambda) = \begin{cases} K_1 \lambda, & \lambda < \lambda_t \\ \mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t), & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (8)$$

[0043] 式中:  $\lambda_t$ ——最优滑转率

[0044]  $\mu_{\max}$ ——最优滑转率对应的路面最大附着系数

[0045]  $K_1, K_2$ ——两段线性关系的斜率绝对值

[0046] 将式(8)带入式(7)得:

[0047] 
$$\dot{\lambda} = \begin{cases} \frac{VT}{RJW^2} - \frac{K_1 \lambda F_z}{RMW} - \frac{K_1 \lambda F_z V}{JW^2}, & \lambda < \lambda_t \\ \frac{VT}{RJW^2} - \frac{(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z}{RMW} - \frac{(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z V}{JW^2}, & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (9)$$

[0048] 选取滑模变结构控制器切换函数如式(10):

[0049]  $s = \lambda - \lambda_t$  (10)

[0050] 选择改进型指数趋近律如式(11):

[0051]  $\dot{s} = -\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) - ks$  (11)

[0052] 式中:  $\varepsilon > 0, k > 0$ 均为系数,根据具体控制系统选取;

[0053] 将式(10)带入式(11)可得:

[0054]  $-\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) - ks = \dot{\lambda} - \dot{\lambda}_t$  (12)

[0055] 将式(12)带入式(9)可得滑模变结构控制器的控制律,如式(13)所示:

$$[0056] \quad T = \begin{cases} RK_1\lambda F_z + \frac{JWK_1\lambda F_z}{MV} - \frac{RJW^2}{V}(\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) + ks), & \lambda < \lambda_t \\ R(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z + \frac{JW(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z}{MV} - \frac{RJW^2}{V}(\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) + ks), & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (13)$$

[0057] 第四步,制动力逻辑门限控制器设计;

[0058] 当判断车轮处于对开路面时,对发生滑转侧车轮启动制动力逻辑门限控制;

[0059] 采用滑转率和车轮角加速度两个门限值控制液压制动系统状态;

[0060] 液压制动系统状态包括增压、保压、降压三个基本状态,其中保压为默认初始状态;

[0061] 当前状态为增压状态时,无条件执行连续增压指令,当车轮滑转率降到最优滑转率以下时,由增压状态跳变到保压状态;

[0062] 当前状态为保压状态时,无条件执行连续保压指令,当车轮滑转率大于最优滑转率且车轮角加速度大于零时,由保压状态跳变到增压状态,当车轮滑转率小于最优滑转率且车轮角加速度小于零时,由保压状态跳变到减压状态;

[0063] 当前状态为减压状态时,无条件执行连续减压指令,当车轮角加速度大于零时,由减压状态跳变到保压状态。

[0064] 第二步中,所述预存的路面标准数据通过反复试验测得,存储在控制器中。

[0065] 第二步中,所述路面参数是指路面附着系数与滑转率分段近似线性关系中两段线性关系下的斜率绝对值 $K_1$ 、 $K_2$ ,最优滑转率 $\lambda_t$ 和最优滑转率对应的路面最大附着系数 $\mu_{\max}$ ;

[0066] 利用Burckhardt  $u-\lambda$ 标准路面模型计算得到驱动工况下纵向附着系数与滑转率关系,如式(14)所示:

$$[0067] \quad u(\lambda) = C_1 * (1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \quad (14)$$

[0068] 式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为不同路面的拟合参数,通过实验统计数据获得;

[0069] 将式(14)求导并令其为零,可得路面最优滑转率和最大附着系数,如式(15)、(16)所示:

$$[0070] \quad \lambda_t = \frac{1}{C_2} \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \quad (15)$$

$$[0071] \quad \mu_{\max} = C_1 - \frac{C_3}{C_2} (1 + \ln \frac{C_1 C_2}{C_3}) \quad (16)$$

[0072] 将路面状况分为极低附着系数路面、低附着系数路面、中低附着系数路面、中高附着系数路面和高附着系数路面,并将各路面对应的 $\lambda_t$ 、 $\mu_{\max}$ 储存在控制器中;

[0073] 路面附着系数与滑转率分段近似线性关系中两段线性关系下的斜率绝对值 $K_1$ 、 $K_2$ 分别由式(17)、(18)计算:

$$[0074] \quad K_1 = \left| \frac{\mu_{\max}}{\lambda_t} \right| \quad (17)$$

$$[0075] \quad K_2 = \left| \frac{\mu_{\max} - \mu_t}{\lambda_t - 1} \right| \quad (18)$$

- [0076] 式中： $\mu_1$ ——滑转率为1时对应的路面附着系数，利用式(14)计算得到。
- [0077] 第四步中，所述液压制动系统的默认初始状态是指制动力逻辑门限控制启动时的状态。
- [0078] 与现有技术相比本发明的有益效果是：
- [0079] 1、本发明所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法通过判断均一低附着系数路面和对开路面两种路况，采用不同的控制方式，在均一低附着系数路面下调节发动机输出转矩防止两驱动轮的过度滑转，在对开路面下采用制动干预控制防止一侧车轮过度滑转，同时充分利用附着系数良好侧车轮的驱动力，保证车辆的工况适应性；
- [0080] 2、本发明所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法通过进一步判断均一低附着系数路面类别，根据不同路况下车轮滑转率与附着系数的关系曲线，将过度滑转车轮的滑转率控制在最优值附近，保证汽车在多种附着系数路面下的动力性和侧向稳定性；
- [0081] 3、本发明所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法采用简便、准确的控制算法，不依赖过多的整车参数且鲁棒性较强，对不同车型具有良好的适用性。

#### 附图说明

- [0082] 下面结合附图对本发明作进一步的说明：
- [0083] 图1是本发明所述应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法框图；
- [0084] 图2是本发明所述应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制系统车轮动力学模型；
- [0085] 图3是本发明所述应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制系统滑模变结构控制框图；
- [0086] 图4是本发明所述应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制系统车轮附着系数与滑转率分段近似线性关系曲线。

#### 具体实施方案

- [0087] 下面结合附图对本发明作详细的描述：
- [0088] 本发明公开了一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法，根据车轮实时滑转率和两侧车轮实时滑转率差值判断车辆处于对开路面或均一低附着系数路面，采用制动力逻辑门限控制对其中处于对开路面的滑转车轮进行制动干预，采用初始制动方式进一步判断均一低附着系数路面下滑转车轮所处路面类型，并采用滑模变结构控制调整滑转车轮驱动转矩，从而达到根据路面类型将车轮滑转率维持在最优值的控制效果。
- [0089] 参见图1，本发明所述的一种应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法主要分为计算车轮实时滑转率和利用附着系数、判断路面类型、滑模变结构驱动防滑控制器设计、制动力逻辑门限控制器设计四步。下面分步具体叙述应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制方法。
- [0090] 包括下列步骤：
- [0091] 第一步，计算车轮实时滑转率和利用附着系数；
- [0092] 本发明研究对象为电驱动桥，由一个驱动电机驱动左右两侧车轮。参见图2，根据应用于汽车电驱动桥的驱动防滑控制系统的车轮动力学模型，可得驱动过程中车轮实时滑

转率,由式(1)计算:

$$[0093] \quad \lambda_i = 1 - \frac{V}{W_i R} \quad (1)$$

[0094] 式中: $\lambda_i$ ——车轮实时滑转率, $i=1,r$ ,分别表示左侧车轮和右侧车轮;

[0095]  $V$ ——车速

[0096]  $W_i$ ——车轮转速

[0097]  $R$ ——车轮半径

[0098] 车轮利用附着系数由式(2)计算:

$$[0099] \quad \mu_i = \frac{F_{xi}}{F_{zi}} \quad (2)$$

[0100] 式中: $\mu_i$ ——利用附着系数

[0101]  $F_{xi}$ ——车轮纵向驱动力

[0102]  $F_{zi}$ ——车轮垂向载荷

[0103] 第二步,判断路面类型;

[0104] 给定车轮滑转率阈值和两侧车轮滑转率差值阈值,如果任一侧车轮实时滑转率大于滑转率阈值且两侧车轮滑转率差值小于滑转率差值阈值,则判断此时路况为均一低附着系数路面;如果任一侧车轮实时滑转率大于滑转率阈值且两侧车轮滑转率差值大于滑转率差值阈值,则判断此时路况为对开路面;

[0105] 当判断车轮处于均一低附着系数路面时,记录此时刻 $t_1$ 及对应的车速值 $V_1$ ,并对发生滑转的车轮进行初始制动控制,当车轮轮速降至所设定的轮速阈值以下时,解除初始制动控制并记录此时刻 $t_2$ 及对应的车速值 $V_2$ ;

[0106] 由式(3)计算在 $t_1-t_2$ 时间段内车辆的平均加速度 $a$ :

$$[0107] \quad a = \frac{V_1 - V_2}{t_1 - t_2} \quad (3)$$

[0108] 将计算得到的平均加速度值与预存的路面标准数据进行对比,确定车轮所处路面类型和路面参数值。

[0109] 第三步,滑模变结构驱动防滑控制器设计;

[0110] 当判断车轮处于均一低附着系数路面时,启动滑模变结构驱动防滑控制。

[0111] 参见图3,滑模变结构控制系统设计过程主要包括切换函数的选择和电机转矩滑模变结构控制律的设计。定义 $\lambda$ 作为控制系统的状态变量,对(1)式求导可得式(4):

$$[0112] \quad \dot{\lambda} = \frac{V \dot{W}}{RW^2} - \frac{\dot{V}}{RW} \quad (4)$$

[0113] 式中: $\lambda = \frac{\lambda_l + \lambda_r}{2}$ ——左右车轮平均滑转率

[0114]  $W = \frac{W_l + W_r}{2}$ ——左右车轮平均转速

[0115] 忽略驱动过程中车轮的滚动阻力和车辆所受空气阻力,车轮动力学方程可由式(5)、(6)计算:

[0116]  $J\dot{W} = T - F_x R$  (5)

[0117]  $F_x = M\dot{V}$  (6)

[0118] 式中: J——车轮转动惯量

[0119]  $T = \frac{T_l + T_r}{2}$ ——左右车轮所受平均驱动转矩

[0120]  $F_x = \frac{F_{xl} + F_{xr}}{2}$ ——左右车轮所受平均纵向驱动力

[0121]  $M = \frac{M_l + M_r}{2}$ ——左右车轮平均簧载质量

[0122] 驱动工况下车轮纵向驱动力与垂直载荷关系由式(2)计算,将式(2)、(5)、(6)带入式(4)中得:

[0123]  $\dot{\lambda} = \frac{VT}{RJW^2} - \frac{\mu F_z}{RMW} - \frac{V\mu F_z}{JW^2}$  (7)

[0124] 式中:  $\mu = \frac{\mu_l + \mu_r}{2}$ ——左右车轮平均利用附着系数

[0125]  $F_z = \frac{F_{zl} + F_{zr}}{2}$ ——左右车轮所受平均垂直载荷

[0126] 参见图4,车轮附着系数与滑转率关系曲线可近似定义为两段线性关系。根据所述第二步中确定的车轮所处路面类型,可得到路面最优滑转率,并以最优滑转率为分界点,定义附着系数与滑转率的分段近似线性关系如式(8)所示:

[0127]  $\mu(\lambda) = \begin{cases} K_1\lambda, & \lambda < \lambda_t \\ \mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t), & \lambda \geq \lambda_t \end{cases}$  (8)

[0128] 式中:  $\lambda_t$ ——最优滑转率

[0129]  $\mu_{\max}$ ——最优滑转率对应的路面最大附着系数

[0130]  $K_1, K_2$ ——两段线性关系的斜率绝对值

[0131] 将式(8)带入式(7)得:

[0132]  $\dot{\lambda} = \begin{cases} \frac{VT}{RJW^2} - \frac{K_1\lambda F_z}{RMW} - \frac{K_1\lambda F_z V}{JW^2}, & \lambda < \lambda_t \\ \frac{VT}{RJW^2} - \frac{(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z}{RMW} - \frac{(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z V}{JW^2}, & \lambda \geq \lambda_t \end{cases}$  (9)

[0133] 选取滑模变结构控制器切换函数如式(10):

[0134]  $s = \lambda - \lambda_t$  (10)

[0135] 选择改进型指数趋近律如式(11):

[0136]  $\dot{s} = -\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) - ks$  (11)

[0137] 式中:  $\varepsilon > 0, k > 0$ 均为系数,根据具体控制系统选取;

[0138] 将式(10)带入式(11)可得:

[0139]  $-\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) - ks = \dot{\lambda} - \dot{\lambda}_t$  (12)

[0140] 将式(12)带入式(9)可得滑模变结构控制器的控制律,如式(13)所示:

$$[0141] \quad T = \begin{cases} RK_1\lambda F_z + \frac{JWK_1\lambda F_z}{MV} - \frac{RJW^2}{V}(\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) + ks), & \lambda < \lambda_t \\ R(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z + \frac{JW(\mu_{\max} - K_2(\lambda - \lambda_t))F_z}{MV} - \frac{RJW^2}{V}(\varepsilon s^2 \operatorname{sgn}(s) + ks), & \lambda \geq \lambda_t \end{cases} \quad (13)$$

[0142] 第四步,制动力逻辑门限控制器设计;

[0143] 当判断车轮处于对开路面时,对发生滑转侧车轮启动制动力逻辑门限控制,即采用滑转率和车轮角加速度两个门限值控制液压制动系统状态。

[0144] 液压制动系统状态包括增压、保压、降压三个基本状态,其中保压为默认初始状态。

[0145] 当前状态为增压状态时,无条件执行连续增压指令,当车轮滑转率降到最优滑转率以下时,由增压状态跳变到保压状态;

[0146] 当前状态为保压状态时,无条件执行连续保压指令,当车轮滑转率大于最优滑转率且车轮角加速度大于零时,由保压状态跳变到增压状态,当车轮滑转率小于最优滑转率且车轮角加速度小于零时,由保压状态跳变到减压状态;

[0147] 当前状态为减压状态时,无条件执行连续减压指令,当车轮角加速度大于零时,由减压状态跳变到保压状态。

[0148] 本发明第二步中,所述预存的路面标准数据通过反复试验测得,存储在控制器中;所述路面参数是指路面附着系数与滑转率分段近似线性关系中两段线性关系下的斜率绝对值 $K_1$ 、 $K_2$ ,最优滑转率 $\lambda_t$ 和最优滑转率对应的路面最大附着系数 $\mu_{\max}$ 。

[0149] 利用Burckhardt  $u$ - $\lambda$ 标准路面模型计算得到驱动工况下纵向附着系数与滑转率关系,如式(14)所示:

$$[0150] \quad u(\lambda) = C_1 * (1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \quad (14)$$

[0151] 式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为不同路面的拟合参数,通过实验统计数据获得;

[0152] 将式(14)求导并令其为零,可得路面最优滑转率和最大附着系数,如式(15)、(16)所示:

$$[0153] \quad \lambda_t = \frac{1}{C_2} \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \quad (15)$$

$$[0154] \quad \mu_{\max} = C_1 - \frac{C_3}{C_2} (1 + \ln \frac{C_1 C_2}{C_3}) \quad (16)$$

[0155] 将路面状况分为极低附着系数路面、低附着系数路面、中低附着系数路面、中高附着系数路面和高附着系数路面,并将各路面对应的 $\lambda_t$ 、 $\mu_{\max}$ 储存在控制器中。

[0156] 路面附着系数与滑转率分段近似线性关系中两段线性关系下的斜率绝对值 $K_1$ 、 $K_2$ 分别由式(17)、(18)计算:

$$[0157] \quad K_1 = \left| \frac{\mu_{\max}}{\lambda_t} \right| \quad (17)$$

$$[0158] \quad K_2 = \left| \frac{\mu_{\max} - \mu_i}{\lambda_i - 1} \right| \quad (18)$$

[0159] 式中： $\mu_1$ ——滑转率为1时对应的路面附着系数，利用式(14)计算得到。

[0160] 本发明第四步中，所述液压制动系统的默认初始状态是指制动力逻辑门限控制启动时的状态。

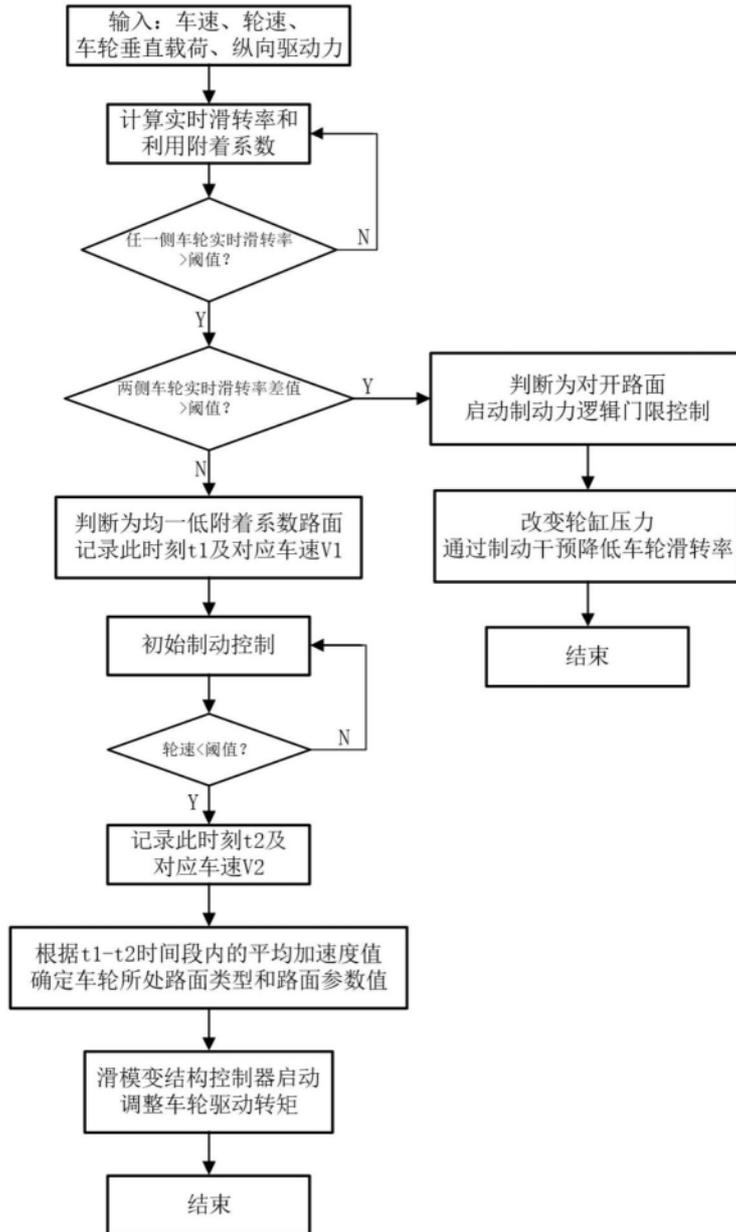


图1

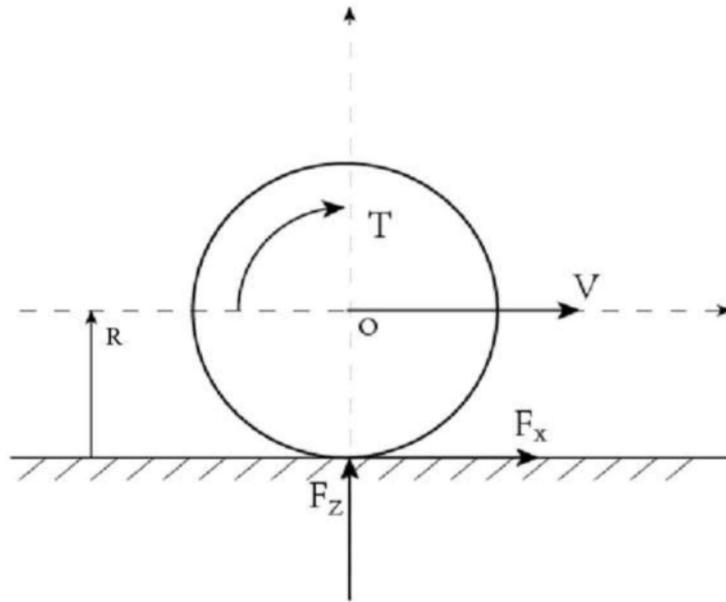


图2

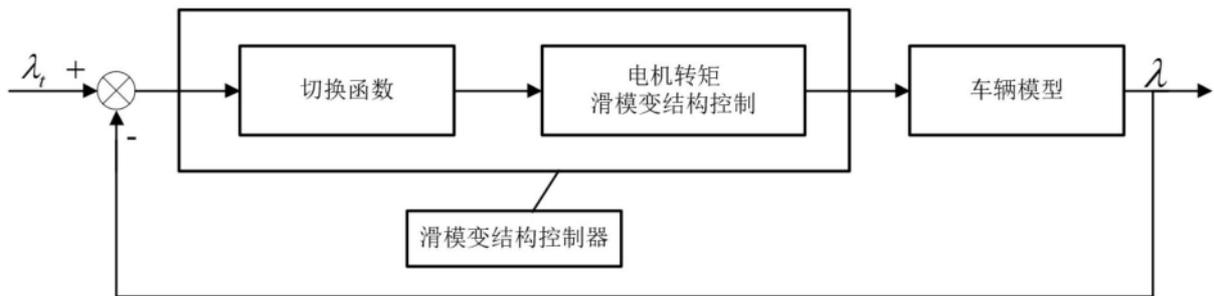


图3

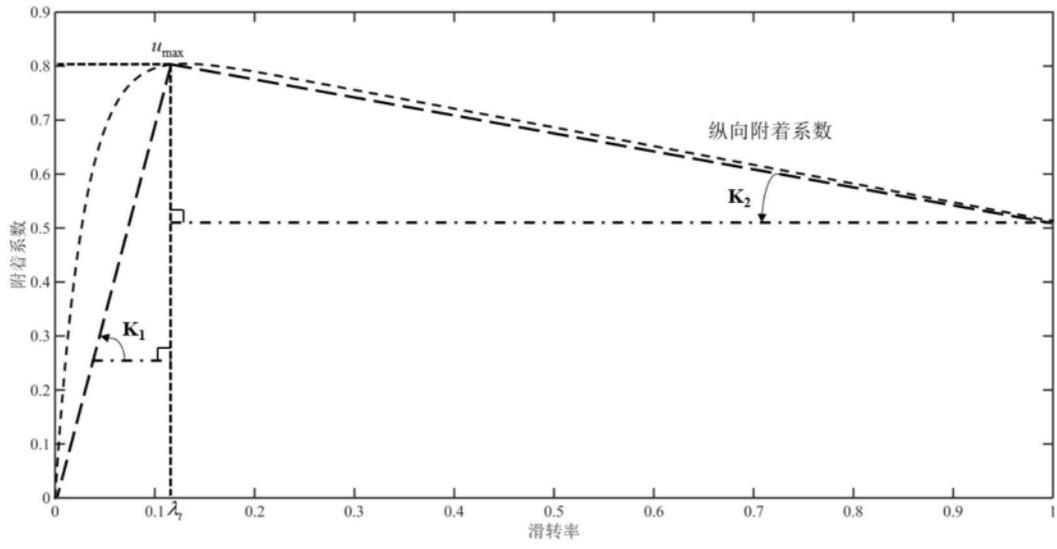


图4