

1. 一种考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制系统,其特征在于,该系统包括:
 - 电机控制器:用以根据车轮驱动转矩控制对应4个车轮的驱动电机;
 - 车辆状态测量单元:用以分别通过传感器实时采集车辆的加速度、路面附着系数、车速、四轮转速和转矩数据,并发送给控制输出约束计算单元;
 - 控制输出约束计算单元:包括车轮垂直载荷估算模块和控制量输出约束计算模块,用以计算车轮输出力矩的范围约束以及每个车轮的垂直载荷;
 - 转矩控制模式单元:用以根据生成的期望滑移率和峰值滑移率获取每个车轮的参考轮速,所述的转矩控制模式单元包括:
 - 预分配模块:用以根据运动控制层的期望总驱动力需求和附加横摆力矩需求计算每个车轮的期望滑移率;
 - 峰值滑移率MAP模块:用以根据实时的路面附着系数查表得到当前车轮的峰值滑移率;
 - 参考轮速模块:用以根据期望滑移率和峰值滑移率的较小值,结合车速信号计算得到每个车轮的参考轮速信号;
 - ASR介入退出判断模块:用以根据车轮的打滑情况进行判断每一个车轮对应的驱动防滑控制模块是否起作用;
 - 驱动防滑控制单元:包括轮速差值计算单元和抗饱和积分滑模变结构控制器,用以根据轮速差值获取每个车轮的控制力矩;
 - 四轮转矩分配单元:根据控制力矩和车轮输出力矩的范围约束重新优化驱动转矩指令发送给电机控制器。
2. 一种采用如权利要求1所述的考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制系统的控制方法,其特征在于,包括以下步骤:
 - 1) 实时采集车辆的加速度、路面附着系数、车速、四轮转速和转矩数据,估计四轮垂直载荷,并获取车轮输出力矩的范围约束;
 - 2) 对运动控制层的广义力需求进行预分配,得到四轮的期望滑移率;
 - 3) 采用查表获取路面附着系数对应的峰值滑移率,获取每个车轮的参考轮速,然后根据四轮实时的车轮打滑程度判断各个车轮的驱动防滑控制是否介入,确定每个车轮的工作模式;
 - 4) 构建抗饱和积分滑模变结构控制器,并以实际轮速和参考轮速的差值作为输入得到控制力矩;
 - 5) 将不打滑的车轮作为二次分配的控制变量,根据驱动防滑控制单元的输出转矩修正参考的驱动力和附加横摆力矩,以广义力跟踪误差最小和附着利用率最小的加权和为目标函数,优化求解出不打滑车轮的输出转矩;
 - 6) 最后结合驱动防滑控制单元和四轮转矩分配控制单元的转矩指令,输出给电机控制器。
3. 根据权利要求2所述的控制方法,其特征在于,所述的步骤1)中,控制量输出的范围约束的获取方法具体为:

根据电机输出能力的范围约束、离散化控制中电机转矩变化的速率约束和当前路面运行的最大电机转矩约束,获取车轮输出力矩的约束范围,则有:

$$\underline{u} \leq u \leq \bar{u}$$

$$\underline{u} = \max[-T_{i_{\max}}(k), -\mu \cdot F_{zi}(k) \cdot r, -\dot{T}_{i_{\max}} \cdot \Delta t + F_{xi}(k-1) \cdot r]$$

$$\bar{u} = \min[T_{i_{\max}}(k), \mu \cdot F_{zi}(k) \cdot r, \dot{T}_{i_{\max}} \cdot \Delta t + F_{xi}(k-1) \cdot r]$$

其中, u 为车轮的输出力矩, \underline{u} 为车轮的输出力矩的最小值, \bar{u} 为车轮的输出力矩的最大值, $T_{i_{\max}}(k)$ 为电机外特性的输出能力限制, μ 为路面附着系数, $F_{zi}(k)$ 为车轮垂直载荷, r 为车轮半径, $\dot{T}_{i_{\max}}$ 为电机输出转矩每个周期的变化最大值, Δt 为周期时间间隔, $F_{xi}(k-1)$ 为上一时刻的车轮纵向力。

4. 根据权利要求2所述的一种控制方法, 其特征在于, 所述的步骤2) 具体包括以下步骤:

21) 根据广义力需求中的期望总驱动力需求 F_{xd} 和期望总附加横摆力矩需求 ΔM_z 计算左右侧的纵向力需求, 则有:

$$F_{x,d}^l = \frac{F_{xd}}{2} - \frac{\Delta M_z}{b}$$

$$F_{x,d}^r = \frac{F_{xd}}{2} + \frac{\Delta M_z}{b}$$

其中, $F_{x,d}^l$ 为车辆左侧的纵向力需求, $F_{x,d}^r$ 为车辆右侧的纵向力需求, b 为车辆轮距;

22) 根据前后轮的垂直载荷比例分配车辆单侧前后轮的需求驱动力, 则有:

$$F_{x,d}^{ij} = \frac{F_z^{ij}}{F_z^i} F_{x,d}^i \quad i = l, r; j = F, R$$

其中, $F_{x,d}^{ij}$ 为每个车轮的需求驱动力, F_z^{ij} 为每个车轮的实时垂直载荷, F_z^i 为每一侧前后车轮的垂直载荷之和, 上标 $i=l$ 表示左轮, $i=r$ 表示右轮, $j=F$ 表示前轮, $j=R$ 表示后轮;

23) 根据各个车轮的纵向力需求获取每个车轮对应的期望滑移率 λ_d^{ij} , 则有:

$$\lambda_d^{ij} = \frac{F_{x,d}^{ij}}{K_{\lambda}^{ij}} \quad K_{\lambda}^{ij} = k(\mu) \cdot F_z^{ij}$$

其中, K_{λ}^{ij} 为每个车轮的纵滑刚度, $k(\mu)$ 为轮胎在不同附着系数路面下的纵滑特性参数。

5. 根据权利要求4所述的一种控制方法, 其特征在于, 所述的步骤3) 中, 每个车轮的参考轮速 ω_{ref}^{ij} 的计算式为:

$$\omega_{ref}^{ij} = \frac{\lambda_{ref}^{ij} \cdot V_x + V_x}{r}$$

$$\lambda_{ref}^{ij} = \min(\lambda_d^{ij}, \lambda_{max}^{ij})$$

其中, λ_{max}^{ij} 为峰值滑移率, λ_{ref}^{ij} 为参考滑移率, v_x 为车轮车速, r 为车轮滚动半径。

6. 根据权利要求5所述的一种控制方法, 其特征在于, 所述的步骤3) 中, 确定每个车轮的工作模式具体为:

当车轮驱动防滑模块不起作用时, 则令标志位flag=0, 当车轮的角加速度大于车辆纵向加速度, 或滑移率超过路面对应的峰值滑移率, 并且维持超过一段时间时, 令标志位flag=1, 车轮驱动防滑控制介入;

在车轮驱动防滑控制介入后, 令标志位flag=1, 当车轮的角加速度小于车辆纵向加速度并且滑移率没有超过路面对应的峰值滑移率维持一段时间后, 驱动防滑控制退出, 并令标志位flag=0;

若车轮对应的标志位flag=1时, 则该车轮的驱动力矩指令由对应的驱动防滑ASR单元接管, 否则, 该车轮的驱动力矩指令由四轮转矩分配单元计算得到。

7. 根据权利要求6所述的一种方法, 其特征在于, 所述的步骤4) 中, 抗饱和和积分滑模变结构控制器具体为:

$$\dot{\rho}^{ij} = -k_i \rho^{ij} + \theta \text{sat} \left(\frac{e^{ij} + k_i \rho^{ij}}{\theta} \right)$$

$$T_{asr}^{ij} = -\frac{1}{2} k_p \cdot T_{tcr}^{ij} \cdot \text{sat} \left(\frac{e^{ij} + k_i \rho^{ij}}{\theta} \right) + \frac{1}{2} k_p \cdot T_{tcr}^{ij}$$

$$T_{tcr}^{ij} = \min(F_{x,d}^{ij} \cdot r, \bar{T})$$

$$e^{ij} = \omega^{ij} - \omega_{ref}^{ij}$$

其中, ρ 为条件积分项, θ 为滑模控制的切换曲面附近的边界层厚度, k_i 为积分增益, k_p 为比例增益, T_{asr}^{ij} 为控制力矩, sat 为饱和函数, \bar{T} 为电机力矩上限, e^{ij} 为实际轮速 ω^{ij} 和参考轮速 ω_{ref}^{ij} 的差值, T_{tcr}^{ij} 为驱动防滑控制器的力矩输出上限值。

8. 根据权利要求7所述的一种控制方法, 其特征在于, 所述的步骤5) 具体包括以下步骤:

51) 四轮转矩分配单元跟根据车轮输出力矩的范围约束和四轮垂直载荷, 根据标志位判断每个车轮的工作模式;

52) 修正运动控制层的广义力需求 v , 则有:

$$v = [F_{x,d} \cdot r - \sum(T_{asr}^{ij} \cdot flag^{ij})$$

$$\Delta M_z - \sum (T_{asr}^{ij} \cdot flag^{ij} \cdot \frac{\varepsilon^i b}{r})]^T$$

$$\varepsilon^i = \begin{cases} -1 & i = l \\ 1 & i = r \end{cases}$$

53) 重新确定分配控制的动态效率矩阵B,对不打滑车轮的驱动转矩进行重新优化分配,则有:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -b & b & -b & b \\ \frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} \end{bmatrix}$$

if flag^{ij}=1B(:,n)=[]

54) 设计目标函数并在线求解出目标驱动转矩。

9. 根据权利要求8所述的一种控制方法,其特征在于,所述的步骤54)中,目标函数的表达式为:

$$u = \arg \min_{\underline{u} \leq u \leq \bar{u}} (\|W_u(u)\|_2^2 + \lambda \|W_v(Bu - v)\|_2^2)$$

其中,u为驱动防滑ASR单元不介入控制时对应的车轮输出力矩,W_u为调节控制输出的权重,W_v为调节广义力的权重,λ为调节分配精度和轮胎利用率以及输出转矩大小之间的权重。

考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及分布式驱动电动汽车四轮转矩协调控制领域,尤其是涉及一种考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制系统及方法。

背景技术

[0002] 分布式驱动电动汽车作为一种先进的电动汽车动力系统,在动力性及经济性方面具有很大优势。分布式驱动电动汽车一般采用轮毂/轮边电机驱动动力系统,作用在车轮上的峰值转矩较大,在起步或者加速阶段容易造成驱动轮的过度滑转,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合理范围内。目前大多数驱动防滑控制方法仍然只考虑单个车轮,缺乏对整车四轮的协调。从系统角度讲,分布式驱动带来可控自由度、操纵稳定性及高效节能等技术优点。由于分布式驱动电动汽车动力系统由于存在多个驱动单元,因此,如何在各个驱动单元之间实现协调控制和转矩分配是一个研究重点。目前具有的转矩分配控制技术包括转矩平均分配法及搜索法等。但以上转矩分配算法都存在一定局限性,缺乏对于车轮驱动防滑控制的考虑。

发明内容

[0003] 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考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制系统及方法。

[0004] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0005] 一种考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制系统,该系统包括:

[0006] 电机控制器:用以根据车轮驱动转矩控制对应4个车轮的驱动电机;

[0007] 车辆状态测量单元:用以分别通过传感器实时采集车辆的加速度、路面附着系数、车速、四轮转速和转矩数据,并发送给控制输出约束计算单元;

[0008] 控制输出约束计算单元:包括车轮垂直载荷估算模块和控制量输出约束计算模块,用以计算车轮输出力矩的范围约束以及每个车轮的垂直载荷;

[0009] 转矩控制模式单元:用以根据生成的期望滑移率和峰值滑移率获取每个车轮的参考轮速;

[0010] 驱动防滑控制单元:包括轮速差值计算单元和抗饱和积分滑模变结构控制器,用以根据轮速差值获取每个车轮的控制力矩;

[0011] 四轮转矩分配单元:根据控制力矩和车轮输出力矩的范围约束重新优化驱动转矩指令发送给电机控制器。

[0012] 所述的转矩控制模式单元包括:

[0013] 预分配模块:用以根据运动控制层的期望总驱动力需求和附加横摆力矩需求计算每个车轮的期望滑移率;

[0014] 峰值滑移率MAP模块:用以根据实时的路面附着系数查表得到当前车轮的峰值滑

移率；

[0015] 参考轮速模块：用以根据期望滑移率和峰值滑移率的较小值，结合车速信号计算得到每个车轮的参考轮速信号；

[0016] ASR介入退出判断模块：用以根据车轮的打滑情况进行判断每一个车轮对应的驱动防滑控制模块是否起作用。

[0017] 一种考虑操纵性与车轮稳定性协调的转矩分配控制方法，包括以下步骤：

[0018] 1) 实时采集车辆的加速度、路面附着系数、车速、四轮转速和转矩数据，估计四轮垂直载荷，并获取车轮输出力矩的范围约束；

[0019] 2) 对运动控制层的广义力需求进行预分配，得到四轮的期望滑移率；

[0020] 3) 采用查表获取路面附着系数对应的峰值滑移率，获取每个车轮的参考轮速，然后根据四轮实时的车轮打滑程度判断各个车轮的驱动防滑控制是否介入，确定每个车轮的工作模式；

[0021] 4) 构建抗饱和和积分滑模变结构控制器，并以实际轮速和参考轮速的差值作为输入得到控制力矩；

[0022] 5) 将不打滑的车轮作为二次分配的控制变量，根据驱动防滑控制单元的输出转矩修正参考的驱动力和附加横摆力矩，以广义力跟踪误差最小和附着利用率最小的加权和为目标函数，优化求解出不打滑车轮的输出转矩；

[0023] 6) 最后结合驱动防滑控制单元和四轮转矩分配控制单元的转矩指令，输出给电机控制器。

[0024] 控制量输出的范围约束的获取方法具体为：

[0025] 根据电机输出能力的范围约束、离散化控制中电机转矩变化的速率约束和当前路面运行的最大电机转矩约束，获取车轮输出力矩的约束范围，则有：

$$[0026] \quad \underline{u} \leq u \leq \bar{u}$$

$$[0027] \quad \underline{u} = \max[-T_{i_{\max}}(k), -\mu \cdot F_{zi}(k) \cdot r, -\dot{T}_{i_{\max}} \cdot \Delta t + F_{xi}(k-1) \cdot r]$$

$$[0028] \quad \bar{u} = \min[T_{i_{\max}}(k), \mu \cdot F_{zi}(k) \cdot r, \dot{T}_{i_{\max}} \cdot \Delta t + F_{xi}(k-1) \cdot r]$$

[0029] 其中， u 为车轮的输出力矩， \underline{u} 为车轮的输出力矩的最小值， \bar{u} 为车轮的输出力矩的最大值， $T_{i_{\max}}(k)$ 为电机外特性的输出能力限制， μ 为路面附着系数， $F_{zi}(k)$ 为车轮垂直载荷， r 为车轮半径，括号内第二项表示由路面附着极限限制的转矩限值， $\dot{T}_{i_{\max}}$ 为电机输出转矩每个周期的变化最大值， Δt 为周期时间间隔， $F_{xi}(k-1)$ 为上一时刻的车轮纵向力，第三项表示由电机输出转矩变化速率限制的转矩限值。

[0030] 所述的步骤2)具体包括以下步骤：

[0031] 21) 根据广义力需求中的期望总驱动力需求 F_{xd} 和期望总附加横摆力矩需求 ΔM_z 计算左右侧的纵向力需求，则有：

$$[0032] \quad F_{x,d}^l = \frac{F_{xd}}{2} - \frac{\Delta M_z}{b}$$

$$[0033] \quad F_{x,d}^r = \frac{F_{xd}}{2} + \frac{\Delta M_z}{b}$$

[0034] 其中, $F_{x,d}^l$ 为车辆左侧的纵向力需求, $F_{x,d}^r$ 为车辆右侧的纵向力需求, b 为车辆轴距;

[0035] 22) 根据前后轮的垂直载荷比例分配车辆单侧前后轮的需求驱动力, 则有:

$$[0036] \quad F_{x,d}^{ij} = \frac{F_z^{ij}}{F_z^i} F_{x,d}^i \quad i = l, r; j = F, R$$

[0037] 其中, $F_{x,d}^{ij}$ 为每个车轮的需求驱动力, F_z^{ij} 为每个车轮的实时垂直载荷, F_z^i 为每一侧前后车轮的垂直载荷之和, 上标 $i = l$ 表示左轮, $i = r$ 表示右轮, $j = F$ 表示前轮, $j = R$ 表示后轮;

[0038] 23) 根据各个车轮的纵向力需求获取每个车轮对应的期望滑移率 λ_d^{ij} , 则有:

$$[0039] \quad \lambda_d^{ij} = \frac{F_{x,d}^{ij}}{K_\lambda^{ij}} \quad K_\lambda^{ij} = k(\mu) \cdot F_z^{ij}$$

[0040] 其中, K_λ^{ij} 为每个车轮的纵滑刚度, $k(\mu)$ 为轮胎在不同附着系数路面下的纵滑特性参数。

[0041] 所述的步骤3) 中, 每个车轮的参考轮速 ω_{ref}^{ij} 的计算式为:

$$[0042] \quad \omega_{ref}^{ij} = \frac{\lambda_{ref}^{ij} \cdot V_x + V_x}{r}$$

$$[0043] \quad \lambda_{ref}^{ij} = \min(\lambda_d^{ij}, \lambda_{max}^{ij})$$

[0044] 其中, λ_{max}^{ij} 为峰值滑移率, λ_{ref}^{ij} 为参考滑移率, V_x 为车轮车速, r 为车轮滚动半径。

[0045] 所述的步骤3) 中, 确定每个车轮的工作模式具体为:

[0046] 当车轮驱动防滑模块不起作用时, 则令标志位 $flag = 0$, 当车轮的角加速度大于车辆纵向加速度, 或滑移率超过路面对应的峰值滑移率, 并且维持超过一段时间时, 令标志位 $flag = 1$, 车轮驱动防滑控制介入;

[0047] 在车轮驱动防滑控制介入后, 令标志位 $flag = 1$, 当车轮的角加速度小于车辆纵向加速度并且滑移率没有超过路面对应的峰值滑移率维持一段时间后, 驱动防滑控制退出, 并令标志位 $flag = 0$;

[0048] 若车轮对应的标志位 $flag = 1$ 时, 则该车轮的驱动力矩指令由对应的驱动防滑 ASR 单元接管, 否则, 该车轮的驱动力矩指令由四轮转矩分配单元计算得到。

[0049] 所述的步骤4) 中, 抗饱和积分滑模变结构控制器具体为:

$$[0050] \quad \dot{\rho}^{ij} = -k_i \rho^{ij} + \theta \text{sat} \left(\frac{e^{ij} + k_i \rho^{ij}}{\theta} \right)$$

$$[0051] \quad T_{asr}^{ij} = -\frac{1}{2} k_p \cdot T_{tcr}^{ij} \cdot \text{sat} \left(\frac{e^{ij} + k_i \rho^{ij}}{\theta} \right) + \frac{1}{2} k_p \cdot T_{tcr}^{ij}$$

$$[0052] \quad T_{tcr}^{ij} = \min(F_{x,d}^{ij} \cdot r, \bar{T})$$

$$[0053] \quad e^{ij} = \omega^{ij} - \omega_{ref}^{ij}$$

[0054] 其中, ρ 为条件积分项, θ 为滑模控制的切换曲面附近的边界层厚度, k_i 为积分增益, k_p 为比例增益, T_{asr}^{ij} 为控制力矩, sat 为饱和函数, \bar{T} 为电机力矩上限, e^{ij} 为实际轮速 ω^{ij} 和参考轮速 ω_{ref}^{ij} 的差值, T_{tcr}^{ij} 为驱动防滑控制器的力矩输出上限值。

[0055] 所述的步骤5)具体包括以下步骤:

[0056] 51) 四轮转矩分配单元根据根据车轮输出力矩的范围约束和四轮垂直载荷,根据标志位判断每个车轮的工作模式;

[0057] 52) 修正运动控制层的广义力需求 v , 则有:

$$[0058] \quad v = [F_{x,d} \cdot r - \sum(T_{asr}^{ij} \cdot flag^{ij})$$

$$[0059] \quad \Delta M_z - \sum(T_{asr}^{ij} \cdot flag^{ij} \cdot \frac{\varepsilon^i b}{r})]^T$$

$$[0060] \quad \varepsilon^i = \begin{cases} -1 & i = l \\ 1 & i = r \end{cases}$$

[0061] 53) 重新确定分配控制的动态效率矩阵 B , 对不打滑车轮的驱动转矩进行重新优化分配, 则有:

$$[0062] \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -b & b & -b & b \\ \frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} & \frac{1}{2r} \end{bmatrix}$$

[0063] if $flag^{ij}=1$ $B(:, n) = []$

[0064] 54) 设计目标函数并在线求解出目标驱动转矩。

[0065] 所述的步骤54)中, 目标函数的表达式为:

$$[0066] \quad u = \arg \min_{u \leq u \leq \bar{u}} (\|W_u(u)\|_2^2 + \lambda \|W_v(Bu - v)\|_2^2)$$

[0067] 其中, u 为驱动防滑ASR单元不介入控制时对应的车轮输出力矩, W_u 为调节控制输

出的权重, W_v 为调节广义力的权重, λ 为调节分配精度和轮胎利用率以及输出转矩大小之间的权重。

[0068] 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0069] 一、二次分配、有效防滑: 本发明通过二次分配的方法, 避免了驱动防滑控制与转矩分配控制之间的相互影响, 利用预分配和对车轮打滑程度的判断确定车轮的工作模式, 优先稳定车轮滑移率, 并且在转矩分配过程中补偿驱动防滑控制的影响, 提高了转矩分配的控制精度, 从而做到在汽车正常运行时又能有效防滑;

[0070] 二、考虑全面、控制精确: 对轮胎的输出力矩的约束范围的求解过程中, 充分考虑了电机输出能力的范围约束、电机转矩变化的速率约束和当前路面运行的最大电机转矩约束, 考虑全面, 提高了控制结果的准确性。

附图说明

[0071] 图1为本发明的控制系统框架示意图。

[0072] 图2为驱动防滑控制介入退出逻辑图。

[0073] 图3为实施例中某轮胎路面峰值附着系数与峰值滑移率一一对应的对比图。

具体实施方式

[0074] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0075] 实施例

[0076] 如图1所示, 本发明提供一种分布式驱动电动汽车四轮转矩分配控制系统, 该系统包括电机控制器和电机力矩分配器, 电机控制器设置4个分别连接对应4个车轮的驱动电机, 该系统还包括车辆状态测量单元, 控制输出约束计算单元, 转矩控制模式单元, 驱动防滑控制单元和四轮转矩分配单元。

[0077] 四轮转矩分配控制系统根据获取的车辆状态信息计算控制输出的约束, 然后根据车轮的打滑程度进行工作模式的判定, 通过车轮的驱动防滑控制单元防止车轮滑移率发散, 并通过四轮转矩分配单元将上层运动控制层需求的期望总驱动力和附加横摆力矩转化为四个驱动电机的转矩指令, 电机控制器控制4个驱动电机运动。

[0078] 车辆状态测量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、用于获取路面附着系数的传感器、用于获取4个车轮实际轮速的转速传感器以及用于获取四个驱动电机转矩的转矩传感器。车辆状态测量单元将获取的加速度、路面附着系数、电机反馈的转速和转矩信号传递给控制输出约束计算单元, 将路面附着系数、车速和轮速信号传递给转矩控制模式单元。

[0079] 控制输出约束计算单元包括车轮垂直载荷估算模块和控制量输出约束计算模块。其中, 车轮垂直载荷估算模块根据车辆参数和车辆加速度信息计算四个车轮的实时垂直载荷, 并将实时的估算结果输出给控制量约束计算模块和后续的转矩分配控制模块。控制量输出约束计算模块根据驱动电机的反馈转速/转矩信息、电机的外特性和响应特性、路面附着能力计算出实时的输出转矩限制, 作为后续转矩计算过程中的约束。

[0080] 车轮垂直载荷估算模块具体为:

$$[0081] \quad F_Z^{fl} = mg \frac{l_f}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y$$

$$[0082] \quad F_Z^{fr} = mg \frac{l_r}{2l} - m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_r}{B_f l} a_y$$

$$[0083] \quad F_Z^{rl} = mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x - m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y$$

$$[0084] \quad F_Z^{rr} = mg \frac{l_f}{2l} + m \frac{h_g}{2l} a_x + m \frac{h_g l_f}{B_r l} a_y$$

[0085] 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。

[0086] 控制量约束计算模块具体为:

[0087] 1) 根据电机当前转速和外特性曲线, 计算得到电机输出能力的范围约束;

[0088] 2) 根据电机的转矩响应特性, 计算在离散化控制中电机转矩变化的速率约束;

[0089] 3) 根据轮胎垂向载荷和路面附着系数, 计算当前路面运行的最大电机转矩约束;

[0090] 4) 根据步骤1) 得到的范围约束、步骤2) 得到的速率约束和步骤3) 得到的最大电机转矩约束, 综合考虑得到车轮的输出力矩的约束范围, 具体为:

[0091] 根据电机当前转速和外特性曲线, 计算当前电机输出能力的范围约束, 本实施例中, 电机所能产生的最大纵向力受其外特性约束如下:

$$[0092] \quad -\frac{T_{i\max}(V)}{r} \leq F_{xi} \leq \frac{T_{i\max}(V)}{r}$$

[0093] $T_{i\max}(V)$ 为当前电机转速所对应的电机峰值扭矩, r 为当前车轮轮胎半径。根据电机台架试验标定电机的转矩响应特性, 计算在离散化控制中电机转矩变化的速率约束, 此处根据试验结果可知 $\dot{T}_{i\max} = 7.5 \text{ Nm/ms}$, 将其转化为车轮纵向力的位置约束为:

$$[0094] \quad F_{xi}(k-1) + \frac{-\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t}{r} \leq F_{xi}(k) \leq F_{xi}(k-1) + \frac{\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t}{r}$$

[0095] 根据车轮垂向载荷和路面附着系数计算当前路面允许的最大车轮纵向力约束:

$$[0096] \quad -\mu \cdot F_{zi} \leq F_{xi} \leq \mu \cdot F_{zi}$$

[0097] 综上, 对分配力矩的约束进行离散化后, 如下式所示:

$$[0098] \quad \underline{u} \leq u \leq \bar{u}$$

$$[0099] \quad \underline{u} = \max[-T_{i\max}(k), -\mu \cdot F_{zi}(k) \cdot r, -\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t + F_{xi}(k-1) \cdot r]$$

$$[0100] \quad \bar{u} = \min[T_{i\max}(k), \mu \cdot F_{zi}(k) \cdot r, \dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t + F_{xi}(k-1) \cdot r]$$

[0101] 其中, u 为车轮的输出力矩, \underline{u} 为车轮的输出力矩的最小值, \bar{u} 为车轮的输出力矩的最大值。

[0102] 转矩控制模式单元包括预分配模块、峰值滑移率MAP模块、参考轮速模块和ASR(驱

动防滑算法)介入退出判断模块。其中,预分配模块将运动控制层的期望总驱动力和附加横摆力矩需求转化为每个车轮的期望滑移率,并输出给后续模块。峰值滑移率MAP模块根据实时的路面附着系数进行查表,得到当前车轮的峰值滑移率,并输出给后续模块。参考轮速模块比较期望滑移率和峰值滑移率的较小值,并结合车速信号计算得到每个车轮的参考轮速信号。ASR介入退出判断模块根据车轮的打滑情况进行判断,决定每一个车轮对应的驱动防滑控制模块是否起作用。

[0103] 预分配模块的工作逻辑具体为:

[0104] 根据运动控制层的输入期望,求解出车辆左右侧的驱动力需求:

$$[0105] \quad F_{x,d}^l = \frac{F_{xd}}{2} - \frac{\Delta M_z}{b} \quad F_{x,d}^r = \frac{F_{xd}}{2} + \frac{\Delta M_z}{b}$$

[0106] 其中, $F_{x,d}^l$ 为车辆左侧的纵向力需求, $F_{x,d}^r$ 为车辆右侧的纵向力需求, F_{xd} 为车辆总的驱动力需求, ΔM_z 为附加横摆力矩需求, b 为车辆轮距。

[0107] 然后车辆单侧的前后轮驱动力分配按照垂直载荷的比值进行划分。

$$[0108] \quad F_{x,d}^{ij} = \frac{F_z^{ij}}{F_z^i} F_{x,d}^i \quad i=l,r; j=F,R$$

[0109] 其中, $F_{x,d}^{ij}$ 为每个车轮的需求驱动力, F_z^{ij} 为每个车轮的实时垂直载荷。

[0110] 根据轮胎的线性刚度,得到每个车轮的目标滑移率为:

$$[0111] \quad \lambda_d^{ij} = \frac{F_{x,d}^{ij}}{K_\lambda^{ij}} \quad K_\lambda^{ij} = k(\mu) \cdot F_z^{ij}$$

[0112] 其中, K_λ^{ij} 为每个车轮的纵滑刚度, $k(\mu)$ 为轮胎在不同附着系数路面下的纵滑特性参数。

[0113] 峰值滑移率MAP模块是根据路面附着系数进行一维查表,如图3所示,得到当前路面下的峰值滑移率 λ_{\max}^{ij} 。

[0114] 参考轮速模块根据当前车速计算参考每个车轮的参考滑移率:

$$[0115] \quad \omega_{ref}^{ij} = \frac{\lambda_{ref}^{ij} \cdot V_x + V_x}{r}$$

$$[0116] \quad \lambda_{ref}^{ij} = \min(\lambda_d^{ij}, \lambda_{\max}^{ij})$$

[0117] 其中, ω_{ref}^{ij} 为参考轮速, λ_{ref}^{ij} 为参考滑移率, V_x 为车速, r 为车轮滚动半径。

[0118] ASR介入退出判断模块根据当前的车速信号和每个车轮的轮速信号计算车轮的滑移率,以及轮加速度,通过判断车轮的滑移率和轮加速度的变化决定每个车轮的转矩控制工作模式。具体的工作逻辑如图2所示:

[0119] (1) 当车轮驱动防滑模块不起作用时,标志位flag=0,此时对车轮的角加速度和车辆纵向加速度进行比较,并且对车轮的滑移率进行监控,当车轮的角加速度过大或者滑移率超过路面对应的峰值滑移率,并且维持超过一定时间后,标志位flag=1,车轮驱动防滑控制介入;

[0120] (2) 当车轮驱动防滑控制介入时,标志位flag=1,此时同样对车轮的角加速度以

及滑移率进行监控,当车轮的角加速度小于车辆的加速度并且滑移率维持在可控范围内一段时间后,驱动防滑控制退出,标志位flag=0。

[0121] 其中, Δ 、 ε 、 ΔT 均为系统标定参数。

[0122] 若某个车轮的标志位flag=1,该车轮的驱动力矩由对应的驱动防滑ASR单元接管,否则,该车轮的驱动力矩指令由四轮转矩分配单元计算得到。

[0123] 驱动防滑控制单元包括由轮速差值计算单元和抗饱和积分滑模变结构控制器组成。轮速差值计算单元计算实际轮速与参考轮速的差值,并将该误差作为抗饱和积分滑模变结构控制器的输入。轮速差值为:

$$[0124] \quad e^{ij} = \omega^{ij} - \omega_{ref}^{ij}$$

[0125] 抗饱和积分滑模变结构控制器具体为:

$$[0126] \quad \dot{\rho}^{ij} = -k_i \rho^{ij} + \theta \text{sat} \left(\frac{e^{ij} + k_i \rho^{ij}}{\theta} \right)$$

$$[0127] \quad T_{asr}^{ij} = -\frac{1}{2} k_p \cdot T_{icr}^{ij} \cdot \text{sat} \left(\frac{e^{ij} + k_i \rho^{ij}}{\theta} \right) + \frac{1}{2} k_p \cdot T_{icr}^{ij}$$

$$[0128] \quad T_{icr}^{ij} = \min(F_{x,d}^{ij} \cdot r, \bar{T})$$

[0129] 其中, ρ 为条件积分项, θ 为滑模控制的切换曲面附近的边界层厚度, k_i 为积分增益, k_p 为比例增益, T_{asr}^{ij} 为控制力矩,sat为饱和函数, \bar{T} 为电机力矩上限。

[0130] 四轮转矩分配单元接收控制输出的约束和四轮垂直载荷信息,根据驱动防滑控制模块的介入情况判断每个车轮的工作模式,并修正运动控制层的广义力需求,对不打滑车轮的驱动转矩进行重新优化分配计算,确定每个车轮的转矩指令后传递给电机控制器。具体的工作逻辑为:

[0131] 1) 修正运动控制层的广义力需求;

$$[0132] \quad v = [F_{x,d} \cdot r - \sum(T_{asr}^{ij} \cdot flag^{ij}) \quad \Delta M_z - \sum(T_{asr}^{ij} \cdot flag^{ij} \cdot \frac{\varepsilon^i b}{r})]^T$$

$$[0133] \quad \varepsilon^i = \begin{cases} -1 & i = l \\ 1 & i = r \end{cases}$$

[0134] 2) 重新确定分配控制的效率矩阵;

$$[0135] \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{-b}{2r} & \frac{b}{2r} & \frac{-b}{2r} & \frac{b}{2r} \end{bmatrix}$$

[0136] if flag^{ij}=1, B(:,n)=[];

[0137] 若任意一个车轮的驱动防滑模块处于介入状态,该车轮的驱动转矩由ASR模块确定,并将其在效率矩阵中对应的列删除。

[0138] 3) 设计目标优化函数并在线求解出目标驱动转矩;

$$[0139] \quad u = \arg \min_{u^- \leq u \leq u^+} (\|W_u(u)\|_2^2 + \lambda \|W_v(Bu - v)\|_2^2)$$

[0140] 其中,u为ASR不介入控制对应的车轮输出力矩,v为广义力需求, W_u 为调节控制输

出的权重, W_v 为调节广义力的权重, B 为动态效率矩阵, λ 为调节分配精度和轮胎利用率以及输出转矩大小之间的权重。

[0141] 这里设置 $W_u = \text{diag}(1/(\mu F_z^{ij})^2)$, $W_v = \text{diag}([1 \ 20]^T)$, $\lambda = 1e6$ 。加权最小二乘算法最大的优势在于将两步运算简化为一步, 大大减少了计算时间。最后利用有效集算法对目标二次优化函数在约束范围内进行求解, 得到车轮的目标转矩。

[0142] 4) 输出四轮转矩指令。

[0143] 结合四轮驱动防滑控制单元和四轮转矩分配单元的计算结果, 得到四个车轮的驱动转矩指令, 并将其输出给电机控制器。

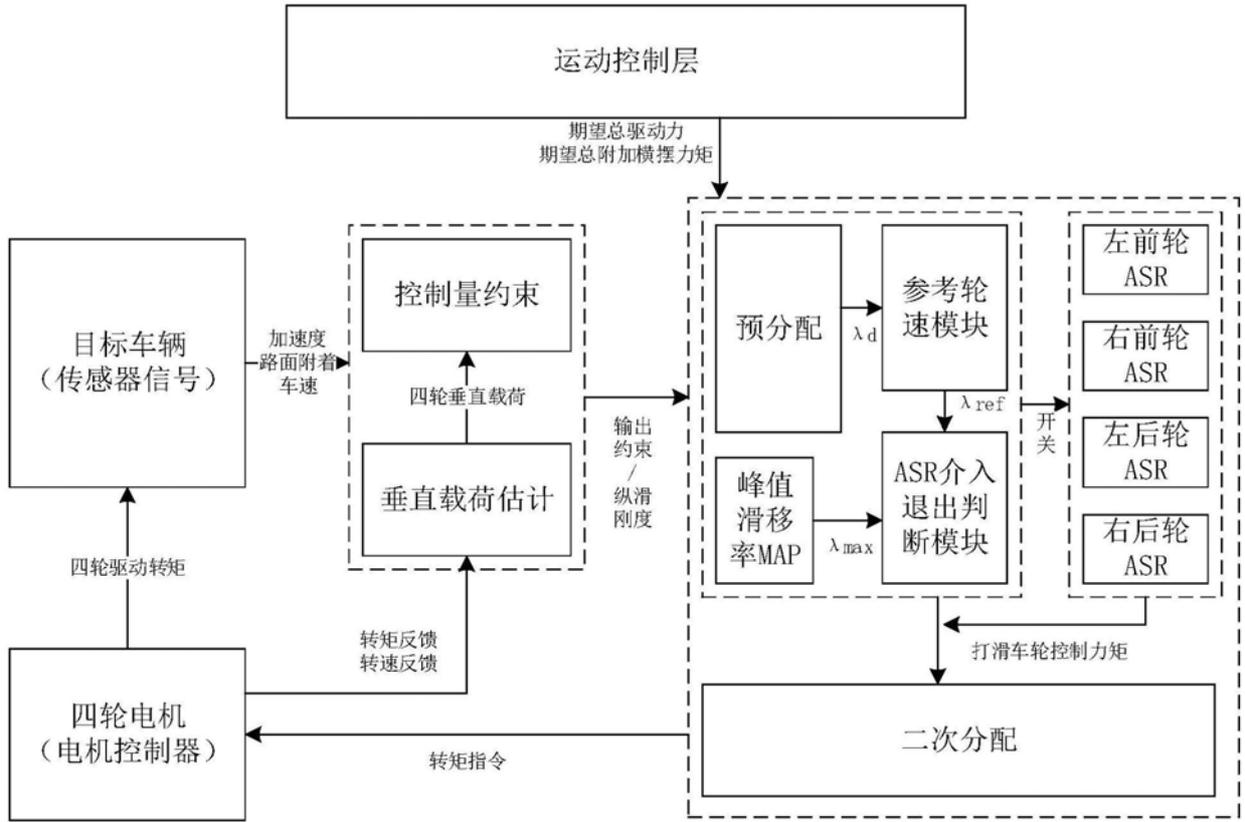


图1

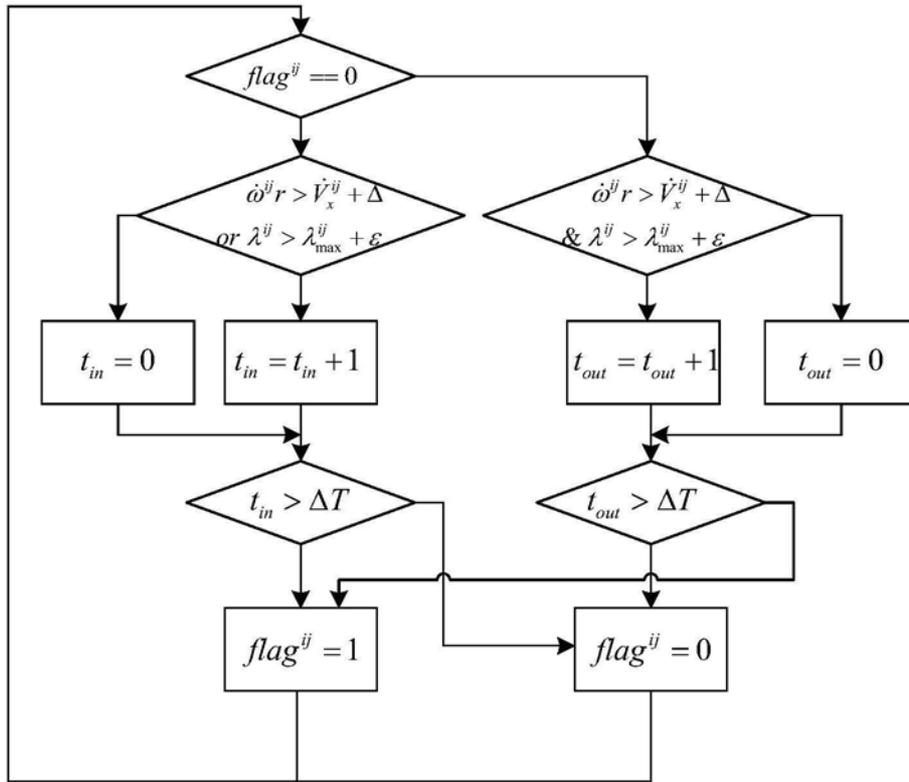


图2

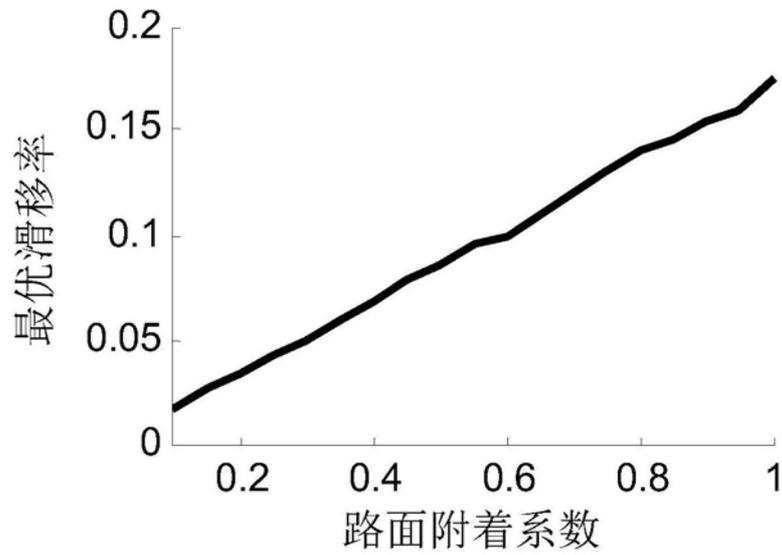


图3