



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107825997 A

(43)申请公布日 2018.03.23

(21)申请号 201711145495.7

(22)申请日 2017.11.17

(66)本国优先权数据

201710791017.7 2017.09.05 CN

(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 熊璐 侯誉焯 冷搏 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 叶敏华

(51)Int.Cl.

B60L 15/20(2006.01)

B60L 15/32(2006.01)

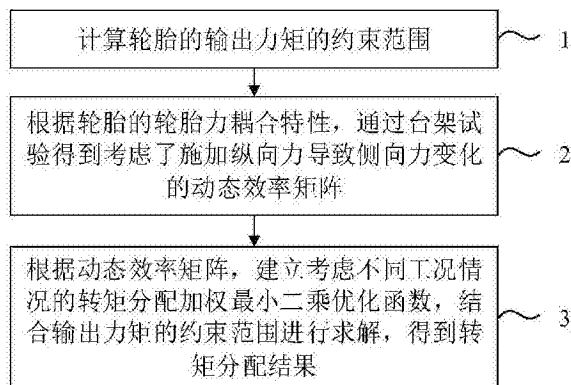
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,所述方法包括下列步骤:计算轮胎的输出力矩的约束范围;根据轮胎的轮胎力耦合特性,通过台架试验得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵;根据动态效率矩阵,建立考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数,结合输出力矩的约束范围进行求解,得到转矩分配结果。与现有技术相比,本发明具有车辆稳定性高以及车辆驱动效率高等优点。



1. 一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述方法包括下列步骤:

1) 计算轮胎的输出力矩的约束范围;

2) 根据轮胎的轮胎力耦合特性,通过台架试验得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵;

3) 根据步骤2)得到的动态效率矩阵,建立考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数,结合步骤1)得到的输出力矩的约束范围进行求解,得到转矩分配结果。

2. 根据权利要求1所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述步骤1)包括:

11) 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;

12) 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;

13) 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;

14) 根据步骤11)得到的范围约束、步骤12)得到的速率约束和步骤13)得到的最大电机转矩约束,综合考虑得到轮胎的输出力矩的约束范围。

3. 根据权利要求2所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述车轮的输出力矩的约束范围具体为:

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

$\underline{u} = \max$ (电机输出能力的范围约束最小值,电机转矩变化的速率约束最小值,最大电机转矩约束最小值)

$$\bar{u} = \min(\text{电机输出能力的范围约束最大值,电机转矩变化的速率约束最大值,最大电机转矩约束最大值})$$

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。

4. 根据权利要求1所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述步骤2)包括:

21) 对轮胎进行台架试验,并根据试验结果进行椭圆拟合;

22) 根据步骤21)的拟合结果,对轮胎的轮胎力耦合特性进行线性化表示;

23) 根据步骤22)得到的线性化表示结果,得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵。

5. 根据权利要求4所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述步骤22)具体为:对步骤21)拟合的椭圆进行局部线性化近似,得到轮胎侧向力增量关于纵向力增量的线性关系。

6. 根据权利要求4所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述步骤23)具体为:对轮胎的横摆力矩和纵向力需求进行离散化处理,结合步骤22)得到的线性化表示结果,得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵。

7. 根据权利要求1所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,其特征在于,所述动态效率矩阵具体为:

$$B = \begin{bmatrix} B_{xd} \\ B_{zx} + B_{zy} \nabla K \end{bmatrix}$$

$$B_{xd} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

其中, B 为动态效率矩阵, ∇K 为轮胎力耦合特性进行线性化表示, B_{zx} 为纵向力与横摆力矩的关系, B_{zy} 为侧向力与横摆力矩的关系。

8. 根据权利要求1所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法, 其特征在于, 所述步骤3) 包括:

31) 建立不同工况下的最小优化目标函数;

32) 根据步骤2) 得到的动态效率矩阵, 将步骤31) 建立的不同工况下的最小优化目标函数统一为考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数;

33) 在步骤1) 得到的输出力矩的约束范围内, 对步骤32) 中的转矩分配加权最小二乘优化函数进行求解。

9. 根据权利要求8所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法, 其特征在于, 所述不同工况下的最小优化目标函数包括常规工况下的最小优化目标函数和极限工况下的最小优化目标函数。

10. 根据权利要求8所述的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法, 其特征在于, 所述考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数具体为:

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

其中, u 为车轮的输出力矩, v 为广义力需求, w_u 为调节控制输出的权重, w_u 在不同工况下取值不同, 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。

一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及汽车控制领域,尤其是涉及一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法。

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。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。同时,不同的转矩分配策略对车辆稳定性、动力性和经济性影响很大。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,缺乏对于轮胎力耦合特性的考虑,导致车辆的稳定性不足。

发明内容

[0003] 本发明的目的是针对上述问题提供一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法。

[0004] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0005] 一种分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,所述方法包括下列步骤:

[0006] 1) 计算轮胎的输出力矩的约束范围;

[0007] 2) 根据轮胎的轮胎力耦合特性,通过台架试验得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵;

[0008] 3) 根据步骤2)得到的动态效率矩阵,建立考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数,结合步骤1)得到的输出力矩的约束范围进行求解,得到转矩分配结果。

[0009] 优选地,所述步骤1)包括:

[0010] 11) 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;

[0011] 12) 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;

[0012] 13) 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;

[0013] 14) 根据步骤11)得到的范围约束、步骤12)得到的速率约束和步骤13)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。

[0014] 优选地,所述车轮的输出力矩的约束范围具体为:

[0015] $\underline{u} \leq u \leq \bar{u}$

[0016] $\underline{u} = \max$ (电机输出能力的范围约束最小值,电机转矩变化的速率约束最小值,最大电机转矩约束最小值)

[0017] $\bar{u} = \min$ (电机输出能力的范围约束最大值,电机转矩变化的速率约束最大值,最大电机转矩约束最大值)

[0018] 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。

[0019] 优选地,所述步骤2)包括:

[0020] 21)对轮胎进行台架试验,并根据试验结果进行椭圆拟合;

[0021] 22)根据步骤21)的拟合结果,对轮胎的轮胎力耦合特性进行线性化表示;

[0022] 23)根据步骤22)得到的线性化表示结果,得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵。

[0023] 优选地,所述步骤22)具体为:对步骤21)拟合的椭圆进行局部线性化近似,得到轮胎侧向力增量关于纵向力增量的线性关系。

[0024] 优选地,所述步骤23)具体为:对轮胎的横摆力矩和纵向力需求进行离散化处理,结合步骤22)得到的线性化表示结果,得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵。

[0025] 优选地,所述动态效率矩阵具体为:

$$[0026] \quad B = \begin{bmatrix} B_{xd} \\ B_{zx} + B_{zy} \nabla K \end{bmatrix}$$

$$[0027] \quad B_{xd} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

[0028] 其中, B 为动态效率矩阵, ∇K 为轮胎力耦合特性进行线性化表示, B_{zx} 为纵向力与横摆力矩的关系, B_{zy} 为侧向力与横摆力矩的关系。

[0029] 优选地,所述步骤3)包括:

[0030] 31)建立不同工况下的最小优化目标函数;

[0031] 32)根据步骤2)得到的动态效率矩阵,将步骤31)建立的不同工况下的最小优化目标函数统一为考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数;

[0032] 33)在步骤1)得到的输出力矩的约束范围内,对步骤32)中的转矩分配加权最小二乘优化函数进行求解。

[0033] 优选地,所述不同工况下的最小优化目标函数包括常规工况下的最小优化目标函数和极限工况下的最小优化目标函数。

[0034] 优选地,所述考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数具体为:

$$[0035] \quad u = \arg \min_{\underline{u} \leq u \leq \bar{u}} (\|W_u(u)\|_2^2 + \lambda \|W_v(Bu - v)\|_2^2)$$

[0036] 其中, u 为车轮的输出力矩, 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。

[0037] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0038] (1)本发明提出的方法,通过考虑轮胎力耦合特性,结合台架试验得到动态效率矩阵,再根据动态效率矩阵得到转矩分配加权最小二乘优化函数,结合轮胎的输出力矩的约束范围,得到转矩分配结果,充分考虑了轮胎力耦合特性对转矩分配带来的影响,提高了车辆的稳定性和驱动效率。

[0039] (2)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。

[0040] (3) 对动态效率矩阵的求解过程中,充分考虑了轮胎纵向力和侧向力之间的线性关系,以及系统横摆力矩对动态效率矩阵的影响,因此得到的动态效率矩阵可以充分体现汽车轮胎各向力之间对汽车转矩的影响,从而提高控制的精度。

[0041] (4) 在对转矩分配结果的计算过程中,首先考虑了常规工况和极限工况两种情况,并分别建立优化函数,考虑工况全面,因而适用范围广,而且控制精度高。

[0042] (5) 在对转矩分配结果的计算过程中,将常规工况和极限工况两种情况的优化函数统一转化成加权最小二乘的问题进行求解,将两步运算简化为一步,大大减少了计算时间,提高了控制效率。

附图说明

[0043] 图1为本发明的方法流程图;

[0044] 图2为车辆纵、侧向轮胎力对车辆状态影响的简图;

[0045] 图3为轮胎椭圆拟合的结果示意图;

[0046] 图4为本实施例中汽车系统内部进行转矩分配算法的流程简图。

具体实施方式

[0047] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。本实施例以本发明技术方案为前提进行实施,给出了详细的实施方式和具体的操作过程,但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0048] 如图1所示为本申请提出的分布式驱动电动汽车的转矩分配控制方法,包括下列步骤:

[0049] 1) 计算轮胎的输出力矩的约束范围:

[0050] 11) 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;

[0051] 12) 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;

[0052] 13) 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;

[0053] 14) 根据步骤11)得到的范围约束、步骤12)得到的速率约束和步骤13)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:

[0054] $\underline{u} \leq u \leq \bar{u}$

[0055] $\underline{u} = \max$ (电机输出能力的范围约束最小值,电机转矩变化的速率约束最小值,最大电机转矩约束最小值)

[0056] $\bar{u} = \min$ (电机输出能力的范围约束最大值,电机转矩变化的速率约束最大值,最大电机转矩约束最大值)

[0057] 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;

[0058] 2) 根据轮胎的轮胎力耦合特性,通过台架试验得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵:

[0059] 21) 对轮胎进行台架试验,并根据试验结果进行椭圆拟合;

[0060] 22) 根据步骤21)的拟合结果,对轮胎的轮胎力耦合特性进行线性化表示,具体为:对步骤21)拟合的椭圆进行局部线性化近似,得到轮胎侧向力增量关于纵向力增量的线性关系;

[0061] 23) 根据步骤22)得到的线性化表示结果,得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵,具体为:对轮胎的横摆力矩和纵向力需求进行离散化处理,结合步骤22)得到的线性化表示结果,得到考虑了施加纵向力导致侧向力变化的动态效率矩阵;

[0062] 3) 根据步骤2)得到的动态效率矩阵,建立考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数,结合步骤1)得到的输出力矩的约束范围进行求解,得到转矩分配结果:

[0063] 31) 建立不同工况下的最小优化目标函数,包括常规工况下的最小优化目标函数和极限工况下的最小优化目标函数;

[0064] 32) 根据步骤2)得到的动态效率矩阵,将步骤31)建立的不同工况下的最小优化目标函数统一为考虑不同工况情况的转矩分配加权最小二乘优化函数;

[0065] 33) 在步骤1)得到的输出力矩的约束范围内,对步骤32)中的转矩分配加权最小二乘优化函数进行求解。

[0066] 本实施例中,根据上述方法实现的转矩分配流程如图4所示,具体为:

[0067] 步骤一、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:

$$[0068] \quad \frac{T_{i\max}(V)}{r} \leq F_{xi} \leq \frac{T_{i\max}(V)}{r}$$

[0069] $T_{i\max}(V)$ 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 $\dot{T}_{i\max} = 7.5Nm/ms$,将其转化为车轮纵向力的位置约束为:

$$[0070] \quad F_{xi}(k-1) + \frac{-\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t}{r} \leq F_{xi}(k) \leq F_{xi}(k-1) + \frac{\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t}{r}$$

[0071] 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:

$$[0072] \quad -\mu \cdot F_{zi} \leq F_{xi} \leq \mu \cdot F_{zi}$$

[0073] 综上所述,对分配力矩的约束进行离散化后,转化为对纵向力增量的约束,如下式所示:

$$[0074] \quad \underline{u} \leq u \leq \bar{u}$$

$$[0075] \quad \underline{u} = \max\left(\frac{T_{i\max}(k)}{r} - F_{xi}(k-1), -\mu \cdot F_{zi}(k) - F_{xi}(k-1), \frac{-\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t}{r}\right)$$

$$[0076] \quad \bar{u} = \min\left(\frac{T_{i\max}(k)}{r} - F_{xi}(k-1), \mu \cdot F_{zi}(k) - F_{xi}(k-1), \frac{\dot{T}_{i\max} \cdot \Delta t}{r}\right)$$

[0077] 步骤二、对轮胎进行台架试验,得到轮胎在不同载荷和轮胎侧偏角下的纵向力和侧向力的关系,并对数据进行拟合,拟合结果如图3所示。由结果可见,轮胎横纵向力近似于椭圆关系。当轮胎不发生打滑或者抱死时,横纵向力处于附着椭圆的上半部分,下半部分是需要避免发生的工况。因此,采用以下公式对附着椭圆进行拟合:

$$[0078] \quad aX^2 + bXY + cY^2 + dX + eY = 1$$

[0079] 式中, X 表示轮胎的纵向力, Y 表示轮胎的侧向力,系数 a, b, c, d, e 与侧偏角,路面

附着系数以及轮胎垂向载荷相关,是拟合参数。针对不同路面附着条件,对结果采用等比例缩放的方式进行选择。需要说明的是,在实际算法设计中对椭圆的边界点应进行限制,既轮胎的横纵向力不可以达到左右极值点,因为此处的斜率无穷大,会导致算法发散。

[0080] 通过对轮胎椭圆进行局部线性化近似,得到轮胎侧向力增量关于纵向力增量的线性关系如下:

$$[0081] \quad \Delta F_{yi} = \nabla K \cdot \Delta F_{xi}$$

$$[0082] \quad \nabla K = \frac{-2a(t)X(t) - b(t)Y(t)}{b(t)X(t) + 2c(t)Y(t)}$$

[0083] 最后通过对横摆力矩和纵向力需求进行离散化处理,得到考虑了侧向力变化后的横摆力矩关于纵向力增量的效率矩阵:

$$[0084] \quad \Delta M_{zxT} = (B_{zx} + B_{zy} \cdot \nabla K) \Delta F_{xi}$$

[0085] 式中: $B_{zx} = [-b/2 \quad b/2 \quad -b/2 \quad b/2]$; b 为轮距 $B_{zy} = [lf \quad lf \quad -lr \quad -lr]$, lf 和 lr 分别为前后轴与质心的纵向距离。

$$[0086] \quad \text{而车辆的纵向力以及横摆力矩需求增量为: } (\Delta F_x \Delta M_{zxT})^T = B \cdot \Delta F_{xi}$$

[0087] 最后修正效率矩阵为:

$$[0088] \quad B = \begin{bmatrix} B_{xd} \\ B_{zx} + B_{zy} \nabla K \end{bmatrix}$$

$$[0089] \quad \text{其中 } B_{xd} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

[0090] 步骤三、在常规工况下采用车轮转矩平方和最小的优化目标能够有效提高车辆转矩的分配效率,而在极限工况下建立轮胎附着利用率最小的车轮转矩分配优化目标函数有利于车辆稳定性控制。

[0091] 在常规工况下,优化目标函数定义为:

$$[0092] \quad \min J_1 = \sum_{i=1}^4 F_{xi}^2$$

[0093] 而在极限工况下,由于侧向力不直接可控,轮胎利用率的定义为:

$$[0094] \quad \eta_i = \frac{\sqrt{F_{xi}^2}}{\mu_i \cdot F_{zi}}$$

[0095] 同时,希望提高大载荷轮胎的利用率,因此引入权重系数“ C_i ”对电机力矩的输出进行调节,以最大化利用载荷较大的车轮的轮胎力,优化目标设定为:

$$[0096] \quad \min J_2 = \sum_{i=1}^4 C_i \frac{F_{xi}^2}{(\mu_i \cdot F_{zi})^2}$$

[0097] 引入载荷转移量 ΔF_{zi} ,设计权重系数如下:

$$[0098] \quad C_i = 1 - \frac{\Delta F_{zi}}{F_{zi_const}}$$

[0099] 其中, F_{zi_const} 是各个车轮的静态载荷, $\Delta F_{zi} = F_{zi} - F_{zi_const}$ 。

[0100] 通过车辆行驶工况进行车辆转矩分配优化函数的自适应。通过车辆的侧向加速度的范围选择不同优化函数。在常规工况下 ($a_y < 0.4\mu g$) 优先提高车辆的驱动效率,选择车轮输出转矩加权平方和最小的优化函数 J_1 。而在极限工况下必须满足车辆稳定性要求,选

择轮胎利用率最小的优化函数J2。为了兼顾实时性和控制精度的要求,权衡分配精度和轮胎利用率以及输出转矩大小的优化目标,将优化分配问题转化成加权最小二乘的问题进行求解:

$$[0101] \quad u = \arg \min_{u^* \leq u \leq u^+} (\|W_u(u)\|_2^2 + \lambda \|W_v(Bu - v)\|_2^2)$$

[0102] 式中, W_u 、 W_v 是权重系数, W_u 调节控制输出的权重, W_v 调节广义力的权重, λ 调节分配精度和轮胎利用率之间的权重, v 为广义力需求(横摆力矩和纵向力)。针对研究的车辆参数以及工况,常规工况下设置 $W_u = \text{diag}(\frac{C_i}{(\mu_i F_{zi})^2})$,而在极限工况下设置 $W_u = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$ 。

$W_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}$, $\lambda = 1e6$ 。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。最后通过有效集算法求解该问题。

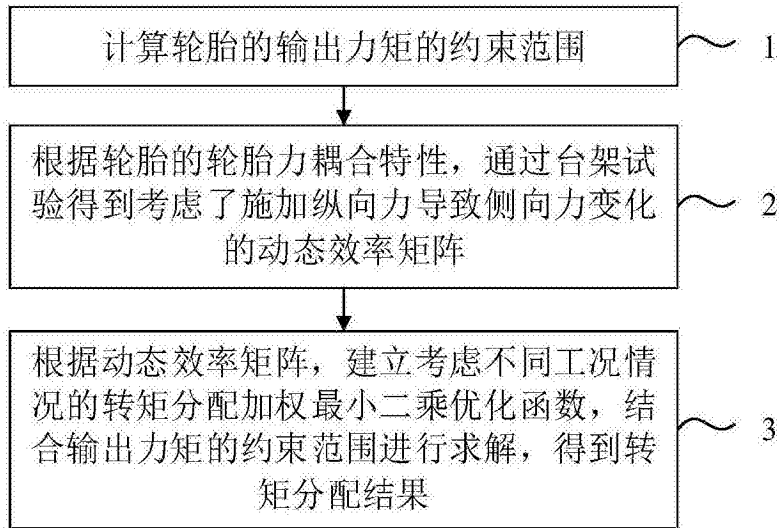


图1

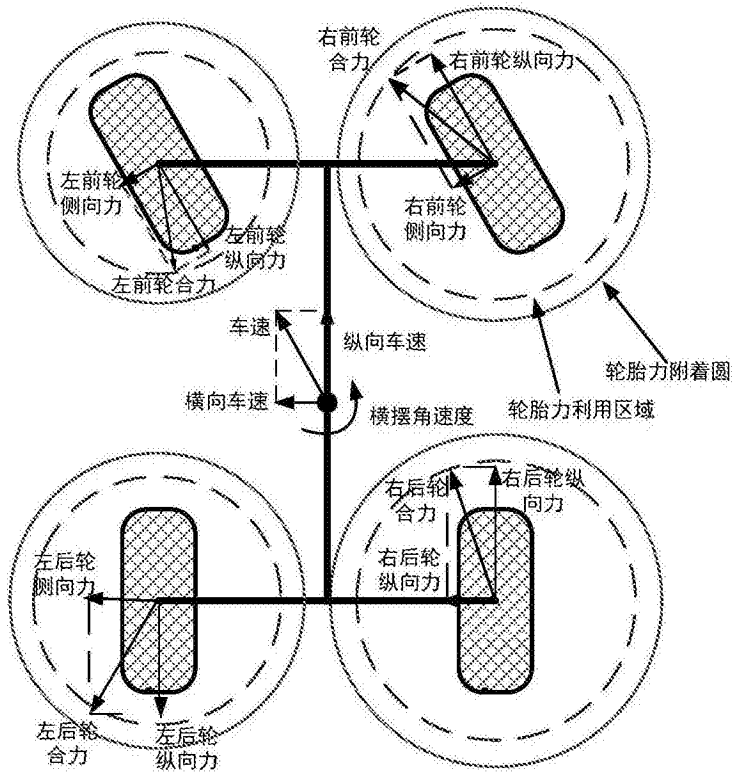


图2

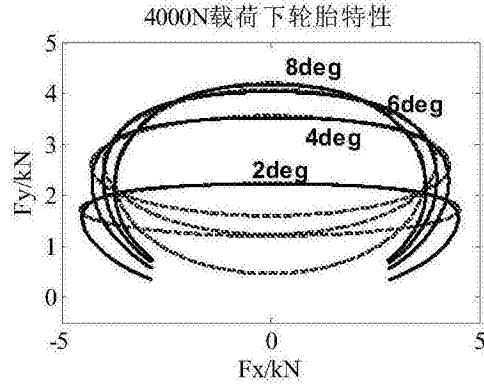


图3

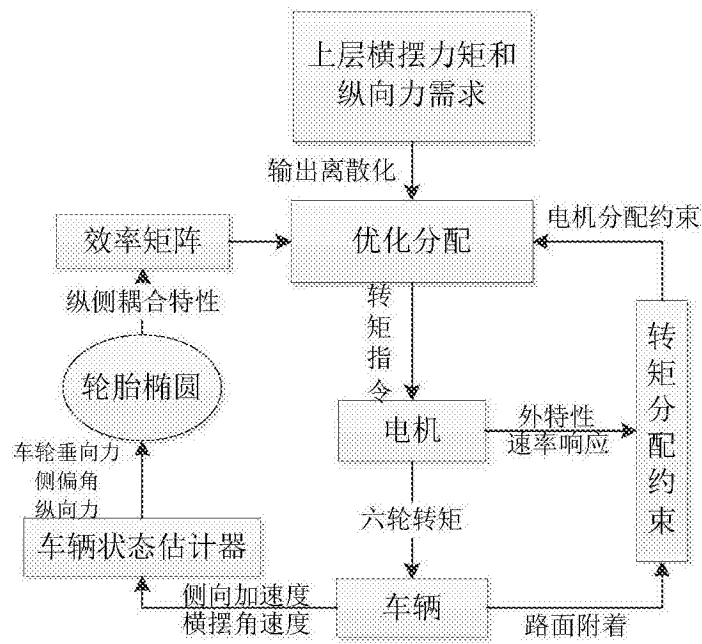


图4