



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118770258 A

(43) 申请公布日 2024.10.15

(21) 申请号 202411112172.8

(22) 申请日 2024.08.14

(71) 申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72) 发明人 殷国栋 史昀珂 庄伟超 李兵兵

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

专利代理师 田凌涛

(51) Int. Cl.

B60W 50/00 (2006.01)

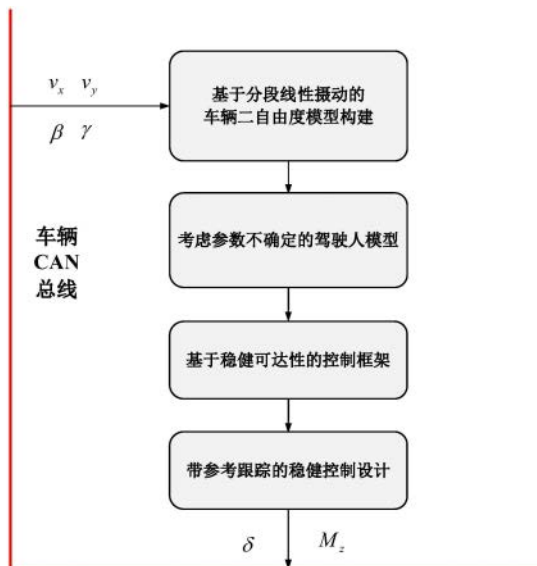
权利要求书4页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,包括建立包含车辆侧滑角和横摆角速度的非线性自行车模型,通过分段线性摄动方法,将模型离散化,并引入多面体约束,以定义系统的运行模式和输入约束;设计基于集合理论和多模型自适应控制的稳健控制策略,以处理驾驶员输入和道路摩擦系数的不确定性;通过求解优化问题,将控制命令分配到各个车轮,确保车辆在各种复杂驾驶条件下的稳定性和操控性。本发明能够在未知驾驶员状态和变化多端的道路条件下,有效提高车辆的动态性能和安全性,适用于需要高稳定性和精确操控的分布式驱动电动汽车。



1. 一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,其特征在于,包括:

S1、构建驾驶人状态未知下的车辆模型;

S2、利用步骤S1中的模型,设计稳健协调控制策略,完成车辆的控制。

2. 根据权利要求1所述的驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,其特征在于,步骤S1中,构建驾驶人状态未知下的车辆模型包括以下子步骤:

S101、构建经典的非线性自行车模型,具体表达式为:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -m\dot{x}\dot{\psi} + 2F_{cf} + 2F_{cr} \\ I\ddot{\psi} &= 2aF_{cf} - 2bF_{cr} + M \end{aligned} \quad (1)$$

其中, m 表示整车质量, \ddot{y} 表示横向加速度, \dot{x} 表示纵向速度, $\dot{\psi}$ 表示横摆角速度, F_{cf} 、 F_{cr} 分别表示前、后轴轮胎侧向力, I 表示车辆绕 z 轴的转动惯量, $\ddot{\psi}$ 表示横摆角速度加速度, a 表示车辆重心到前轴的距离, b 表示车辆重心到后轴的距离, M 表示外部横摆力矩;

基于Pacejka模型获得轮胎侧向力 $F_{c\cdot}$,具体表达式为:

$$F_{c\cdot} = f_{c\cdot}(\alpha\cdot, \sigma\cdot, F_{z\cdot}, \mu\cdot) \quad (2)$$

其中, $f_{c\cdot}$ 表示名义轮胎侧向力, $\alpha\cdot$ 表示轮胎侧滑角, $\sigma\cdot$ 表示滑移率, $\mu\cdot$ 表示轮胎与路面之间的摩擦系数, $F_{z\cdot}$ 表示法向力;

S102、假设:

(1) 所有轮胎的摩擦系数和法向力为已知数据,且恒定、相等;

(2) 纵向速度为已知数据且恒定,并假设 $\sigma\cdot$ 为零;

则 $F_{c\cdot}$ 仅为 $\alpha\cdot$ 的函数,使用小角度近似并假设后轮无转向, $\alpha\cdot$ 表示为状态和输入的线性函数,具体表达式为:

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \frac{\dot{y} + a\dot{\psi}}{\dot{x}} - \delta_f \\ \alpha_r &= \frac{\dot{y} - b\dot{\psi}}{\dot{x}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, α_f 表示前轮侧偏角, α_r 表示后轮侧偏角, \dot{y} 表示横向速度, δ_f 表示相对于车辆纵向轴的前轮转向角;

S103、利用分段线性摄动方法对非线性轮胎里进行线性化处理,非线性函数在公式(2)中的分段线性摄动如公式(4)所示:

$$f_{c\cdot}^{pwa}(\alpha\cdot) = \begin{cases} c_s\alpha\cdot + (c_l + c_s)\hat{\alpha}\cdot, & \alpha\cdot \leq -\hat{\alpha}\cdot, \\ -c_l\alpha\cdot, & -\hat{\alpha}\cdot \leq \alpha\cdot \leq \hat{\alpha}\cdot, \\ c_s\alpha\cdot - (c_l + c_s)\hat{\alpha}\cdot, & \alpha\cdot \geq \hat{\alpha}\cdot, \end{cases} \quad (4)$$

其中, $f_{c\cdot}^{pwa}(\alpha\cdot)$ 表示非线性函数, c_s 表示轮胎在饱和区域的角力刚度, c_l 表示轮胎在线性区域的角力刚度, $\hat{\alpha}\cdot$ 表示侧向力最大的滑移角;

S104、组合公式(1)、(3)和(4),得到分段线性摄动自行车模型,具体表达式为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + B_i \begin{bmatrix} \delta_f \\ M \end{bmatrix} + f_i, \quad (i=1,2,\dots,9) \quad (5)$$

其中, A_i 表示状态转移矩阵, B_i 表示控制矩阵, f_i 表示残差项;

S105、分段线性摄动自行车模型有九种模式,由前轮的三种模式和后轮的三种模式的所有可能组合而成;在配备前轮转向系统的车辆中, δ_f 由两个独立输入之和构成,具体公式为:

$$\delta_f = \delta_d + \delta_{AFS} \quad (6)$$

其中, δ_d 表示驾驶员在转向盘上的输入, δ_{AFS} 表示前轮转向输入;

S106、在输入中引入附加不确定性 w_u , 则利用离散时间状态空间形式将分段线性摄动自行车模型表示为:

$$\begin{aligned} z(k+1) &= A_{di} z(k) + B_{di} u(k) + W_{di} \delta_d(k) + f_{di} + B_{di} w_u, \\ (z, u, \delta_d) &\in Q_i, w_u \in W_u(u) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, z 表示输出变量, $z := [\dot{y}, \dot{\psi}]^T$; u 表示控制变量, $u := [\delta_{AFS}, M]^T$; Q_i 表示车辆的第 i 种模式对应的状态和输入约束的多面体区域的集合; $W_u(u)$ 表示上限的集合值映射;

S107、根据步骤S106得到的 $\delta_d \in W_z(z)$ 的约束,通过假设最坏情况获得 δ_d 边界,其中 $W_z(\cdot)$ 表示 z 的集合值映射;基于线性自行车模型的稳态转弯分析,推导出 δ_d 的最大边界,在稳态条件下, $\dot{\psi}$ 和 δ_f 的关系表示为:

$$\dot{\psi}_{ss} = G_{\psi,ss} \delta_{f,ss} \quad (8)$$

其中, $\dot{\psi}_{ss}$ 表示稳态横摆角速度; $\delta_{f,ss}$ 表示前轮稳态转角; $G_{\psi,ss}$ 表示稳态横摆率增益, $G_{\psi,ss} := \frac{1}{K_{\psi,ss}}$, $K_{\psi,ss}$ 表示横摆角速度增益的倒数;

设定处于稳态条件下无控制的条件,即 $\delta_{AFS,ss} = 0$, 得到:

$$\begin{aligned} \delta_{f,ss} &= K_{\psi,ss} \dot{\psi}_{ss} \\ \delta_{f,ss} &= \delta_{d,ss} \end{aligned} \quad (9);$$

使用公式(9)中获得的 $\delta_{d,ss}$ 作为驾驶员转向输入的线性状态估计,设定 $\delta_{d,ss}$ 的实际值位于以 $\delta_{d,ss}$ 为中心的区间内,因此得到摄动范围,具体表达式为:

$$W_z(z) = \left\{ \delta_d : |\delta_d - K_{\psi,ss} \dot{\psi}| \leq \epsilon, |\delta_d| \leq \delta_{d,max} \right\} \quad (10)$$

其中, ϵ 表示非负参数, $\delta_{d,max}$ 表示 δ_d 的最大值;

约束 $\delta_d \in W_z(z)$ 表示为 \mathbb{R}^3 中的多面体约束,具体表达式为:

$$\delta_d \in W_z(z) \Leftrightarrow (z, \delta_d) \in W_d \subseteq \mathbb{R}^3 \quad (11)$$

其中, W_d 表示前轮转角的摄动集合。

3. 根据权利要求2所述的驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,其特征在于,步骤S2中,完成车辆的控制包括以下子步骤:

S201、设定前后轮胎在所有允许的驾驶员在转向盘上的输入值 δ_d 和附加不确定性值 w_u 下处于线性区域时的线性模式为模式1；当车辆超出模式1时，利用控制器得到转向输入，使得车辆在一个时间步长内回到模式1；当车辆处于模式1时，利用控制器使得下一时间步的车辆同样处于模式1，具体内容为：

在状态空间中，给定目标集 Z 的单步稳健后向可达集定义为：

$$\text{Pre}(Z) := z : \forall \delta_d \in W_z(z), \exists u \rightarrow (z, u, \delta_d) \in Q, z^+ \in Z, \forall w_u \in W_u(u) \quad (12)$$

其中， z^+ 表示下一时间步的预测状态，通过公式(7)获得； Q 表示车辆九种模式对应的状态和输入约束的多面体区域的集合， $Q = \bigcup_{i=1}^9 Q_i$ ； $\text{Pre}(Z)$ 表示单步稳健后向可达集；

设定 $P_1 = \text{Proj}_z(Q_1)$ ，其中 $Q_1 \subseteq \mathbb{R}^5$ 为模式1的状态和输入约束，稳健控制不变量集、最大稳健控制不变集和相应的控制映射表示为：

如果对于每个 $z \in Z_i^1$ 和每个 $\delta_d \in W_z(z)$ ，存在控制 u 使得 $(z, u, \delta_d) \in Q_1$ 且 $z^+ \in Z_i^1$ ，并且对于所有 $w_u \in W_u(u)$ 都成立，则集合 $Z_i^1 \subseteq P_1$ 是模式1的稳健控制不变量集，其中模式1的最大稳健控制不变量集 Z_∞^1 是包括所有模式1中的 Z_i^1 的稳健控制不变量集，对应于 Z_∞^1 的控制映射 $U_\infty^1(\cdot)$ 定义为：

$$U_\infty^1(z, \delta_d) := u : (z, u, \delta_d) \in Q_1, z^+ \in Z_\infty^1, \forall w_u \in W_u(u) \quad (13) ;$$

目标集 Z 的 N 步后向可达集 Z_N 表示为：

$$Z_k = \text{Pre}(Z_{k-1}), (k=1, \dots, N), Z_0 = Z \quad (14) ;$$

如果车辆状态位于 Z_N 中，则通过一系列控制输入 $u(k) k=0^{N-1}$ 保证车辆的状态在 N 步内控制到目标集 Z 内；

与 Z_k 对应的控制映射 $U_k(\cdot)$ 表示为：

$$U_k(z, \delta_d) := u : (z, u, \delta_d) \in Q, z^+ \in Z_{k-1}, \forall w_u \in W_u(u) \quad (15) ;$$

当车辆状态超出稳健控制不变量集时，通过公式(15)生成控制序列，使得 N 个步长之后车辆的预测状态位于目标集内，控制器将状态驱回 Z_∞^1 ；

S202、最优控制输入的具体公式为：

$$u^* = \arg \min_{u \in U^*(z, \delta_d)} (z^+ - r)^T Q (z^+ - r) + (u - u_{\text{pre}})^T R (u - u_{\text{pre}}) \quad (16)$$

其中， u^* 表示最优控制输入， $u^* = [\delta_{\text{AFS}}, M]^T$ ； Q 和 R 表示正定矩阵， u_{pre} 表示前一时间步命令的控制输入； r 表示参考信号， $r = [\dot{y}_{\text{ref}}, \dot{\psi}_{\text{ref}}]^T$ ；

如果 $z \in Z_\infty^1$ ，则 $U^*(z, \delta_d) = U_\infty^1(z, \delta_d)$ ，反之则 $U^*(z, \delta_d) = U_k(z, \delta_d)$ ，其中 k 表示 $z \in Z_k$ 时的最小正整数；

公式(16)仅适用于当车辆处于模式1或前轮胎未饱和时；当前轮胎饱和时，对前轮滑移角施加罚项，AFS仅控制前轮滑移角，因此优化控制问题转化为：

$$u^* = \arg \min_{u \in U_k(z, \delta_d)} (z^+ - r)^T Q (z^+ - r) + (u - u_{\text{pre}})^T R (u - u_{\text{pre}}) + P (\delta_f - \hat{\delta}_f)^2 \quad (17)$$

其中 $P > 0$, $\hat{\delta}_f$ 表示下一时间步前轮滑移角的线性近似值;

u^* 包括两个部分: $u^*(1)$ 表示前轮转向角, $\delta_{AFS} = u^*(1)$, $u^*(2)$ 表示横摆力矩命令;
两者通过CAN总线发送给执行器,完成整个控制过程。

一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及车辆控制系统技术领域,具体涉及一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法。

背景技术

[0002] 随着汽车工业的快速发展和驾驶安全性的日益重视,现代车辆普遍配备了多种主动安全系统,例如ESC(Electronic Stability Control,电子稳定控制)和AFS(Active Front Steering,主动前轮转向)系统。ESC系统通过对车轮制动力矩的控制,提高车辆在转弯和紧急避障情况下的稳定性;而AFS系统通过调整前轮的转向角度,改善车辆的操控性能和响应速度。

[0003] 尽管现有的ESC和AFS系统在提高车辆稳定性和操控性方面取得了显著成效,但它们在面对复杂的驾驶环境和不确定的驾驶员行为时仍存在一定的局限性。传统的控制策略通常假设驾驶员的输入是已知的,并且能够准确预测道路摩擦系数和车辆动力学参数。然而,在实际驾驶过程中,驾驶员的意图和输入往往具有很大的不确定性,同时道路条件和车辆状态也可能发生突变,这些因素都会影响车辆的动态性能和控制效果。

发明内容

[0004] 本发明的目的是:提供一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,通过构建基于多模型自适应控制和集合理论的控制框架,将驾驶员输入和车辆状态的不确定性纳入控制设计中,从而实现了对车辆横摆角速度和质心侧偏角的精确控制,确保车辆在各种驾驶条件下的稳定性和操控性。

[0005] 为了解决以上技术问题,本发明的技术方案是:一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,包括以下步骤:

[0006] S1、构建驾驶人状态未知下的车辆模型。

[0007] S2、利用步骤S1中的模型,设计稳健协调控制策略,完成车辆的控制。

[0008] 进一步的,步骤S1中,构建驾驶人状态未知下的车辆模型包括以下子步骤:

[0009] S101、构建经典的非线性自行车模型,具体表达式为:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -m\dot{x}\dot{\psi} + 2F_{cf} + 2F_{cr} \\ I\ddot{\psi} &= 2aF_{cf} - 2bF_{cr} + M \end{aligned} \quad (18)$$

[0011] 其中, m 表示整车质量, \ddot{y} 表示横向加速度, \dot{x} 表示纵向速度, $\dot{\psi}$ 表示横摆角速度, F_{cf} 、 F_{cr} 分别表示前、后轴轮胎侧向力, I 表示车辆绕 z 轴的转动惯量, $\ddot{\psi}$ 表示横摆角速度加速度, a 表示车辆重心到前轴的距离, b 表示车辆重心到后轴的距离, M 表示外部横摆力矩。

[0012] 基于Pacejka模型获得轮胎侧向力 $F_{c\cdot}$,具体表达式为:

$$F_{c\cdot} = f_{c\cdot}(\alpha\cdot, \sigma\cdot, F_z\cdot, \mu\cdot) \quad (19)$$

[0014] 其中, $f_{c\cdot}$ 表示名义轮胎侧向力, $\alpha\cdot$ 表示轮胎侧滑角, $\sigma\cdot$ 表示滑移率, $\mu\cdot$ 表示轮

胎与路面之间的摩擦系数, F_z 表示法向力。

[0015] S102、假设:

[0016] (1) 所有轮胎的摩擦系数和法向力为已知数据, 且恒定、相等;

[0017] (2) 纵向速度为已知数据且恒定, 并假设 $\sigma \cdot$ 为零;

[0018] 则 F_c 仅为 $\alpha \cdot$ 的函数, 使用小角度近似并假设后轮无转向, $\alpha \cdot$ 表示为状态和输入的线性函数, 具体表达式为:

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \frac{\dot{y} + a\dot{\psi}}{\dot{x}} - \delta_f \\ \alpha_r &= \frac{\dot{y} - b\dot{\psi}}{\dot{x}} \end{aligned} \quad (20)$$

[0020] 其中, α_f 表示前轮侧偏角, α_r 表示后轮侧偏角, \dot{y} 表示横向速度, δ_f 表示相对于车辆纵向轴的前轮转向角。

[0021] S103、利用分段线性摄动方法对非线性轮胎里进行线性化处理, 非线性函数在公式 (19) 中的分段线性摄动如公式 (21) 所示:

$$f_{c_s}^{pwa}(\alpha \cdot) = \begin{cases} c_s \alpha \cdot + (c_l + c_s) \hat{\alpha} \cdot, & \alpha \cdot \leq -\hat{\alpha} \cdot, \\ -c_l \alpha \cdot, & -\hat{\alpha} \cdot \leq \alpha \cdot \leq \hat{\alpha} \cdot, \\ c_s \alpha \cdot - (c_l + c_s) \hat{\alpha} \cdot, & \alpha \cdot \geq \hat{\alpha} \cdot, \end{cases} \quad (21)$$

[0023] 其中, $f_{c_s}^{pwa}(\alpha \cdot)$ 表示非线性函数, c_s 表示轮胎在饱和区域的角力刚度, c_l 表示轮胎在线性区域的角力刚度, $\hat{\alpha} \cdot$ 表示侧向力最大的滑移角。

[0024] S104、组合公式 (18)、(20) 和 (21), 得到分段线性摄动自行车模型, 具体表达式为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + B_i \begin{bmatrix} \delta_f \\ M \end{bmatrix} + f_i, \quad (i=1, 2, \dots, 9) \quad (22)$$

[0026] 其中, A_i 表示状态转移矩阵, B_i 表示控制矩阵, f_i 表示残差项。

[0027] S105、分段线性摄动自行车模型有九种模式, 由前轮的三种模式和后轮的三种模式的所有可能组合而成; 在配备前轮转向系统的车辆中, δ_f 由两个独立输入之和构成, 具体公式为:

$$\delta_f = \delta_d + \delta_{AFS} \quad (23)$$

[0029] 其中, δ_d 表示驾驶员在转向盘上的输入, δ_{AFS} 表示前轮转向输入。

[0030] S106、在输入中引入附加不确定性 w_u , 则利用离散时间状态空间形式将分段线性摄动自行车模型表示为:

$$\begin{aligned} z(k+1) &= A_{di} z(k) + B_{di} u(k) + W_{di} \delta_d(k) + f_{di} + B_{di} w_u, \\ (z, u, \delta_d) &\in Q_i, w_u \in W_u(u) \end{aligned} \quad (24)$$

[0032] 其中, z 表示输出变量, $z := [\dot{y}, \dot{\psi}]^T$; u 表示控制变量, $u := [\delta_{AFS}, M]^T$; Q_i 表示车辆的第 i 种模式对应的状态和输入约束的多面体区域的集合; $W_u(u)$ 表示上限的集合值映射。

[0033] S107、根据步骤S106得到的 $\delta_d \in W_z(z)$ 的约束, 通过假设最坏情况获得 δ_d 边界, 其中

$W_z(\cdot)$ 表示 z 的集合值映射; 基于线性自行车模型的稳态转弯分析, 推导出 δ_d 的最大边界, 在稳态条件下, $\dot{\psi}$ 和 δ_f 的关系表示为:

$$[0034] \quad \dot{\psi}_{ss} = G_{\psi,ss} \delta_{f,ss} \quad (25)$$

[0035] 其中, $\dot{\psi}_{ss}$ 表示稳态横摆角速度; $\delta_{f,ss}$ 表示前轮稳态转角; $G_{\psi,ss}$ 表示稳态横摆率增益, $G_{\psi,ss} := \frac{1}{K_{\psi,ss}}$, $K_{\psi,ss}$ 表示横摆角速度增益的倒数。

[0036] 设定处于稳态条件下无控制的条件, 即 $\delta_{AFS,ss} = 0$, 得到:

$$[0037] \quad \begin{aligned} \delta_{f,ss} &= K_{\psi,ss} \dot{\psi}_{ss} \\ \delta_{f,ss} &= \delta_{d,ss} \end{aligned} \quad (26)。$$

[0038] 使用公式 (26) 中获得的 $\delta_{d,ss}$ 作为驾驶员转向输入的线性状态估计, 设定 $\delta_{d,ss}$ 的实际值位于以 $\delta_{d,ss}$ 为中心的区间内, 因此得到摄动范围, 具体表达式为:

$$[0039] \quad W_z(z) = \left\{ \delta_d : |\delta_d - K_{\psi,ss} \dot{\psi}| \leq \epsilon, |\delta_d| \leq \delta_{d,max} \right\} \quad (27)$$

[0040] 其中, ϵ 表示非负参数, $\delta_{d,max}$ 表示 δ_d 的最大值。

[0041] 约束 $\delta_d \in W_z(z)$ 表示为 \mathbb{R}^3 中的多面体约束, 具体表达式为:

$$[0042] \quad \delta_d \in W_z(z) \Leftrightarrow (z, \delta_d) \in W_d \subseteq \mathbb{R}^3 \quad (28)$$

[0043] 其中, W_d 表示前轮转角的摄动集合。

[0044] 进一步的, 步骤 S2 中, 完成车辆的控制包括以下子步骤:

[0045] S201、设定前后轮胎在所有允许的驾驶员在转向盘上的输入值 δ_d 和附加不确定性值 w_u 下处于线性区域时的线性模式为模式 1; 当车辆超出模式 1 时, 利用控制器得到转向输入, 使得车辆在一个时间步长内回到模式 1; 当车辆处于模式 1 时, 利用控制器使得下一时间步的车辆同样处于模式 1, 具体内容为:

[0046] 在状态空间中, 给定目标集 Z 的单步稳健后向可达集定义为:

$$[0047] \quad \text{Pre}(Z) := z : \forall \delta_d \in W_z(z), \exists u \rightarrow (z, u, \delta_d) \in Q, z^+ \in Z, \forall w_u \in W_u(u) \quad (29)$$

[0048] 其中, z^+ 表示下一时间步的预测状态, 通过公式 (24) 获得; Q 表示车辆九种模式对应的状态和输入约束的多面体区域的集合, $Q = \bigcup_{i=1}^9 Q_i$; $\text{Pre}(Z)$ 表示单步稳健后向可达集。

[0049] 设定 $P_1 = \text{Proj}_z(Q_1)$, 其中 $Q_1 \subseteq \mathbb{R}^5$ 为模式 1 的状态和输入约束, 稳健控制不变量集、最大稳健控制不变集和相应的控制映射表示为:

[0050] 如果对于每个 $z \in Z_i^1$ 和每个 $\delta_d \in W_z(z)$, 存在控制 u 使得 $(z, u, \delta_d) \in Q_1$ 且 $z^+ \in Z_i^1$, 并且对于所有 $w_u \in W_u(u)$ 都成立, 则集合 $Z_i^1 \subseteq P_1$ 是模式 1 的稳健控制不变量集, 其中模式 1 的最大稳健控制不变量集 Z_∞^1 是包括所有模式 1 中的 Z_i^1 的稳健控制不变量集, 对应于 Z_∞^1 的控制映射 $U_\infty^1(\cdot)$ 定义为:

[0051] $U_{\infty}^1(z, \delta_d) := u : (z, u, \delta_d) \in Q_1, z^+ \in Z_{\infty}^1, \forall w_u \in W_u(u)$ (30)。

[0052] 目标集Z的N步向后可达集 Z_N 表示为:

[0053] $Z_k = \text{Pre}(Z_{k-1}), (k=1, \dots, N), Z_0 = Z$ (31)。

[0054] 如果车辆状态位于 Z_N 中,则通过一系列控制输入 $u(k) k=0^{N-1}$ 保证车辆的状态在N步内控制到目标集Z内。

[0055] 与 Z_k 对应的控制映射 $U_k(\cdot)$ 表示为:

[0056] $U_k(z, \delta_d) := u : (z, u, \delta_d) \in Q, z^+ \in Z_{k-1}, \forall w_u \in W_u(u)$ (32);

[0057] 当车辆状态超出稳健控制不变量集时,通过公式(15)生成控制序列,使得N个步长之后车辆的预测状态位于目标集内,控制器将状态驱回 Z_{∞}^1 。

[0058] S202、最优控制输入的具体公式为:

[0059] $u^* = \arg \min_{u \in U^*(z, \delta_d)} (z^+ - r)^T Q (z^+ - r) + (u - u_{\text{pre}})^T R (u - u_{\text{pre}})$ (33)

[0060] 其中, u^* 表示最优控制输入, $u^* = [\delta_{\text{AFS}}, M]^T$;Q和R表示正定矩阵, u_{pre} 表示前一时间步命令的控制输入; r 表示参考信号, $r = [\dot{y}_{\text{ref}}, \dot{\psi}_{\text{ref}}]^T$ 。

[0061] 如果 $z \in Z_{\infty}^1$,则 $U^*(z, \delta_d) = U_{\infty}^1(z, \delta_d)$,反之则 $U^*(z, \delta_d) = U_k(z, \delta_d)$,其中k表示 $z \in Z_k$ 时的最小正整数。

[0062] 公式(33)仅适用于当车辆处于模式1或前轮胎未饱和时;当前轮胎饱和时,对前轮滑移角施加罚项,AFS仅控制前轮滑移角,因此优化控制问题转化为:

[0063] $u^* = \arg \min_{u \in U_k(z, \delta_d)} (z^+ - r)^T Q (z^+ - r) + (u - u_{\text{pre}})^T R (u - u_{\text{pre}}) + P(\delta_f - \hat{\delta}_f)^2$ (34)

[0064] 其中 $P > 0$, $\hat{\delta}_f$ 表示下一时间步前轮滑移角的线性近似值

[0065] u^* 包括两个部分: $u^*(1)$ 表示前轮转向角, $\delta_{\text{AFS}} = u^*(1)$, $u^*(2)$ 表示横摆力矩命令;两者通过CAN总线发送给执行器,完成整个控制过程。

[0066] 本发明采用以上技术方案与现有技术相比,具有以下技术效果:

[0067] 本发明提出的方法能够在未知驾驶员状态和变化多端的道路条件下,有效提高车辆的动态性能和安全性,适用于需要高稳定性和精确操控的分布式驱动电动汽车。

附图说明

[0068] 图1是本发明的整体实施流程图。

[0069] 图2是本发明的二自由度自行车模型图。

具体实施方式

[0070] 下面结合附图对本发明作进一步描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案,而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0071] 为实现上述目的,本发明提出一种驾驶人状态未知下的车辆稳健协调控制方法,如图1所示,具体步骤如下:

[0072] S1、构建驾驶人状态未知下的车辆模型:建立一个非线性自行车模型,该模型考虑

了车辆的质心侧偏角和横摆角速度,以便在不同驾驶条件下模拟和预测车辆行为。然后,通过分段线性摄动方法,将模型离散化,并引入多面体约束,以定义系统的运行模式和输入约束。最后,考虑到驾驶员输入的不可预测性,将驾驶员的转向输入作为一种有界扰动引入模型,将可能的动态变化和误差加入建模中。具体内容为:

[0073] S101、构建经典的非线性自行车模型,如图2所示,具体表达式为:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -m\dot{x}\dot{\psi} + 2F_{cf} + 2F_{cr} \\ I\ddot{\psi} &= 2aF_{cf} - 2bF_{cr} + M \end{aligned} \quad (35)$$

[0075] 其中, m 表示整车质量, \ddot{y} 表示横向加速度, \dot{x} 表示纵向速度, $\dot{\psi}$ 表示横摆角速度, F_{cf} 、 F_{cr} 分别表示前、后轴轮胎侧向力, I 表示车辆绕 z 轴的转动惯量, $\ddot{\psi}$ 表示横摆角速度加速度, a 表示车辆重心到前轴的距离, b 表示车辆重心到后轴的距离, M 表示外部横摆力矩。

[0076] 基于Pacejka模型获得轮胎侧向力 $F_{c\cdot}$,具体表达式为:

$$F_{c\cdot} = f_{c\cdot}(\alpha\cdot, \sigma\cdot, F_z\cdot, \mu\cdot) \quad (36)$$

[0078] 其中, $f_{c\cdot}$ 表示名义轮胎侧向力, $\alpha\cdot$ 表示轮胎侧滑角, $\sigma\cdot$ 表示滑移率, $\mu\cdot$ 表示轮胎与路面之间的摩擦系数, $F_z\cdot$ 表示法向力。

[0079] S102、假设:

[0080] (1) 摩擦系数和法向力是已知的,恒定且对两个轮子相同;

[0081] (2) 纵向速度是已知且恒定的。忽略了纵向车辆动力学,并假设 $\sigma\cdot$ 为零(纯侧倾);

[0082] 则 $F_{c\cdot}$ 仅为 $\alpha\cdot$ 的函数,使用小角度近似并假设后轮无转向, $\alpha\cdot$ 表示为状态和输入的线性函数,具体表达式为:

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \frac{\dot{y} + a\dot{\psi}}{\dot{x}} - \delta_f \\ \alpha_r &= \frac{\dot{y} - b\dot{\psi}}{\dot{x}} \end{aligned} \quad (37)$$

[0084] 其中, α_f 表示前轮侧偏角, α_r 表示后轮侧偏角, \dot{y} 表示横向速度, δ_f 表示相对于车辆纵向轴的前轮转向角。

[0085] S103、利用分段线性摄动方法对非线性轮胎里进行线性化处理,非线性函数在公式(36)中的分段线性摄动如公式(38)所示:

$$f_{c\cdot}^{pwa}(\alpha\cdot) = \begin{cases} c_s\alpha\cdot + (c_l + c_s)\hat{\alpha}\cdot, & \alpha\cdot \leq -\hat{\alpha}\cdot, \\ -c_l\alpha\cdot, & -\hat{\alpha}\cdot \leq \alpha\cdot \leq \hat{\alpha}\cdot, \\ c_s\alpha\cdot - (c_l + c_s)\hat{\alpha}\cdot, & \alpha\cdot \geq \hat{\alpha}\cdot, \end{cases} \quad (38)$$

[0087] 其中, $f_{c\cdot}^{pwa}(\alpha\cdot)$ 表示非线性函数, c_s 表示轮胎在饱和区域的角力刚度, c_l 表示轮胎在线性区域的角力刚度, $\hat{\alpha}\cdot$ 表示侧向力最大的滑移角。

[0088] S104、组合公式(35)、(37)和(38),得到分段线性摄动自行车模型,具体表达式为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + B_i \begin{bmatrix} \delta_f \\ M \end{bmatrix} + f_i, \quad (i=1,2,\dots,9) \quad (39)$$

[0090] 其中, A_i 表示状态转移矩阵, B_i 表示控制矩阵, f_i 表示残差项。

[0091] S105、分段线性摄动自行车模型有九种模式, 由前轮的三种模式和后轮的三种模式的所有可能组合而成; 需要注意的是, 在配备前轮转向系统的车辆中, δ_f 由两个独立输入之和构成, 即:

$$[0092] \quad \delta_f = \delta_d + \delta_{\text{AFS}} \quad (40)$$

[0093] 其中, δ_d 表示驾驶员在转向盘上的输入, δ_{AFS} 表示前轮转向输入。

[0094] S106、在输入中引入一个附加不确定性 w_u , 以考虑未建模的执行器动态和输入延迟, 则分段线性摄动自行车模型可以用离散时间状态空间形式表示为:

$$[0095] \quad \begin{aligned} z(k+1) &= A_{di}z(k) + B_{di}u(k) + W_{di}\delta_d(k) + f_{di} + B_{di}w_u, \\ (z, u, \delta_d) &\in Q_i, w_u \in W_u(u) \end{aligned} \quad (41)$$

[0096] 其中, z 表示输出变量, $z := [\dot{y}, \dot{\psi}]^T$; u 表示控制变量, $u := [\delta_{\text{AFS}}, M]^T$; Q_i 表示车辆的第 i 种模式对应的状态和输入约束的多面体区域的集合; $W_u(u)$ 表示上限的集合值映射。

[0097] 需要注意的是, $W_u(\cdot)$ 被定义为集合值函数, 因为输入中的不确定性可能取决于其值, 这里每个控制输入的不确定性为 10%。

[0098] S107、根据步骤 S106 得到了 $\delta_d \in W_z(z)$ 的约束, 其中 $W_z(\cdot)$ 是状态 z 的集合值映射, 可以通过假设最坏情况获得保守的 δ_d 边界; 基于线性自行车模型的稳态转弯分析, 可以推导出 δ_d 的最大边界。在稳态条件下, $\dot{\psi}$ 和 δ_d 的关系表示为:

$$[0099] \quad \dot{\psi}_{ss} = \frac{v_x}{l \left(1 + \frac{v_x^2}{v_{ch}^2} \right)} \delta_{f,ss} = \frac{\delta_{f,ss}}{K_{\psi,ss}} = G_{\psi,ss} \delta_{f,ss} \quad (42)$$

[0100] 其中, $\dot{\psi}_{ss}$ 表示稳态横摆角速度; $v_x = \dot{x}$; $l = a + b$; v_{ch} 表示车辆的特征速度; $\delta_{f,ss}$ 表示前轮稳态转角; $K_{\psi,ss}$ 表示横摆角速度增益的倒数; $G_{\psi,ss}$ 表示稳态横摆率增益, $G_{\psi,ss} := \frac{1}{K_{\psi,ss}}$ 。

[0101] 设定在稳态条件下无控制的条件, 即 $\delta_{\text{AFS},ss} = 0$, 得到:

$$[0102] \quad \delta_{f,ss} = \delta_{d,ss} = K_{\psi,ss} \dot{\psi}_{ss} \quad (43)$$

[0103] 使用公式 (43) 中获得的 $\delta_{d,ss}$ 值作为驾驶员转向输入的线性状态估计, 设定 $\delta_{d,ss}$ 的实际值位于以 $\delta_{d,ss}$ 为中心的区间内, 因此得到摄动范围, 具体表达式为:

$$[0104] \quad W_z(z) = \left\{ \delta_d : |\delta_d - K_{\psi,ss} \dot{\psi}| \leq \epsilon, |\delta_d| \leq \delta_{d,max} \right\} \quad (44)$$

[0105] 其中, ϵ 表示非负参数, 一般设置为 1; $\delta_{d,max}$ 表示 δ_d 的最大值。

[0106] 约束 $\delta_d \in W_z(z)$ 表示为 \mathbb{R}^3 中的多面体约束, 具体表达式为:

$$[0107] \quad \delta_d \in W_z(z) \Leftrightarrow (z, \delta_d) \in W_d \subseteq \mathbb{R}^3 \quad (45)$$

[0108] 其中, W_d 表示前轮转角的摄动集合。

[0109] S2、利用步骤 S1 中的模型, 设计稳健协调控制策略, 完成车辆的控制: 通过建立稳健控制不变集, 确保在存在扰动和不确定性的情况下, 车辆的状态仍然处于安全范围内。然后, 使用预测控制策略, 将驾驶员输入视为测量扰动, 同时将主动前轮转向作为受约束的控

制输入。通过这一策略,每个时间步都能对驾驶员输入的不确定性进行稳健控制。最后,设计控制律,通过求解二次优化问题,生成最优控制输入,以确保车辆在各种复杂驾驶条件下保持稳定。具体内容为:

[0110] S201、设计基于稳健可达性的控制框架:设定前后轮胎在所有允许的驾驶员在转向盘上的输入值 δ_d 和附加不确定性值 w_u 下处于线性区域时的线性模式为模式1;当车辆超出模式1时,利用控制器得到一个可行的转向输入,确保车辆在一个时间步长内回到模式1;当车辆处于模式1时,利用控制器使得下一时间步的车辆也处于模式1,具体内容为:

[0111] 在状态空间中,给定目标集 Z 的单步稳健向后可达集定义为:

$$[0112] \quad \text{Pre}(Z) := z : \forall \delta_d \in W_z(z), \exists u \rightarrow (z, u, \delta_d) \in Q, z^+ \in Z, \forall w_u \in W_u(u) \quad (46)$$

[0113] 其中, z^+ 表示下一时间步的预测状态,通过公式(41)可获得; Q 表示车辆九种模式对应的状态和输入约束的多面体区域的集合, $Q = \bigcup_{i=1}^9 Q_i$; $\text{Pre}(Z)$ 表示单步稳健后向可达集。

[0114] 映射 $\text{Pre}(\cdot)$ 给出了存在至少一个可行输入的状态集,这些输入可以确保在所有允许的 δ_d 和 w_u 值下,预测状态位于目标集 Z 内。除了单步可控集之外,还引入与模式1相关的稳健控制不变量集和相应的控制映射的概念。假设 $P_1 = \text{Proj}_z(Q_1)$,其中 $Q_1 \subseteq \mathbb{R}^5$ 为模式1的状态和输入约束。稳健控制不变量集、最大稳健控制不变集以及相应的控制映射如下所示:

[0115] 定义1:如果对于每个 $z \in Z_i^1$ 和每个 $\delta_d \in W_z(z)$,存在一个控制 u 使得 $(z, u, \delta_d) \in Q_1$ 且 $z^+ \in Z_i^1$,并且对于所有 $w_u \in W_u(u)$ 都成立,则集合 $Z_i^1 \subseteq P_1$ 是模式1的稳健控制不变量集,其中模式1的最大稳健控制不变量集 Z_∞^1 是包含所有模式1中的 Z_i^1 的稳健控制不变量集。而对应于 Z_∞^1 的控制映射 $U_\infty^1(\cdot)$ 定义为:

$$[0116] \quad U_\infty^1(z, \delta_d) := u : (z, u, \delta_d) \in Q_1, z^+ \in Z_\infty^1, \forall w_u \in W_u(u) \quad (47)。$$

[0117] 如果车辆状态 z 位于 Z_∞^1 中,那么对于每个转角 $\delta_d \in W_z(z)$,从 $U_\infty^1(z, \delta_d)$ 中选择任何输入 u 都会使得下一时间步的预测状态保持在 Z_∞^1 内。然而,由于模型中的不确定的因素(如突然的扰动、表面摩擦系数的变化等),车辆状态可能会超出 Z_∞^1 。在这种存在参数不确定的情况下,仍然希望在 N 步的时间步长内内将车辆状态控制回模式1稳健控制不变量集。为了便于说明,这里这引出了 N 步向后可达集的概念。

[0118] 定义2:目标集 Z 的 N 步向后可达集 Z_N ,可以通过递归迭代方法进行定义,如公式(48)所示:

$$[0119] \quad Z_k = \text{Pre}(Z_{k-1}), (k=1, \dots, N), Z_0 = Z \quad (48)。$$

[0120] 如果车辆状态位于 Z_N 中,则可以通过一系列控制输入 $u(k) k=0^{N-1}$,保证车辆的状态在 N 步内控制到目标集 Z 内。 Z_N 一般是非凸的,因为它是多个凸集的并集。其次,可以定义与 k 步向后可达集对应的控制映射。

[0121] 定义3:与 Z_k 对应的控制映射 $U_k(\cdot)$ 定义为:

$$[0122] \quad U_k(z, \delta_d) := u : (z, u, \delta_d) \in Q, z^+ \in Z_{k-1}, \forall w_u \in W_u(u) \quad (49)。$$

[0123] 当车辆状态超出稳健控制不变量集时,可以通过公式(49)生成控制序列,确保 N 个步长之后车辆的预测状态位于目标集内,确保控制器最终将在有限的时间步内将状态驱回

Z_{∞}^1 。

[0124] (2) 带参考跟踪的稳健控制设计

[0125] 稳定性控制系统提供前轮转向修正指令和横摆力矩控制,以跟踪状态空间中的给定参考信号。参考信号 $r = [\dot{y}_{\text{ref}}, \dot{\psi}_{\text{ref}}]^T$ 是当前状态和驾驶员转向输入的函数,最优控制输入 u^* 的计算公式为:

$$[0126] \quad u^* = \arg \min_{u \in U^*(z, \delta_d)} (z^+ - r)^T Q (z^+ - r) + (u - u_{\text{pre}})^T R (u - u_{\text{pre}}) \quad (50)$$

[0127] 其中Q和R是适当选择的正定矩阵, u_{pre} 是前一时间步命令的控制输入, $u^* = [\delta_{\text{AFS}}, M]^T$ 。

[0128] 根据当前z的值,允许的控制输入集 $U^*(z, \delta_d)$ 由公式(47)或(49)定义。如果 $z \in Z_{\infty}^1$, 那么 $U^*(z, \delta_d) = U_{\infty}^1(z, \delta_d)$, 否则的话 $U^*(z, \delta_d) = U_k(z, \delta_d)$, 其中k是 $z \in Z_k$ 时的最小正整数。

[0129] 公式(50)仅在车辆处于模式1或前轮胎未饱和时使用。如果前轮胎饱和,对前轮滑移角施加罚项,以驱动其到达使横向力最大化的值。在这种情况下,AFS仅对前轮滑移角提供控制,忽略后轮滑移角在代价函数中的作用。因此,优化控制问题转化为:

$$[0130] \quad u^* = \arg \min_{u \in U_k(z, \delta_d)} (z^+ - r)^T Q (z^+ - r) + (u - u_{\text{pre}})^T R (u - u_{\text{pre}}) + P (\delta_f - \hat{\delta}_f)^2 \quad (51)$$

[0131] 其中 $P > 0$, $\hat{\delta}_f$ 是下一时间步前轮滑移角的线性近似值, $\hat{\delta}_f$ 是在最大化横向力时前轮滑移角的值。

[0132] 控制输入 u^* 包含两个部分: $u^*(1)$ 是前轮转向角, $\delta_{\text{AFS}} = u^*(1)$, $u^*(2)$ 是横摆力矩命令。两者通过CAN总线发送给执行器,完成整个控制过程。

[0133] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明技术原理的前提下,还可以做出若干改进和变形,这些改进和变形也应视为本发明的保护范围。

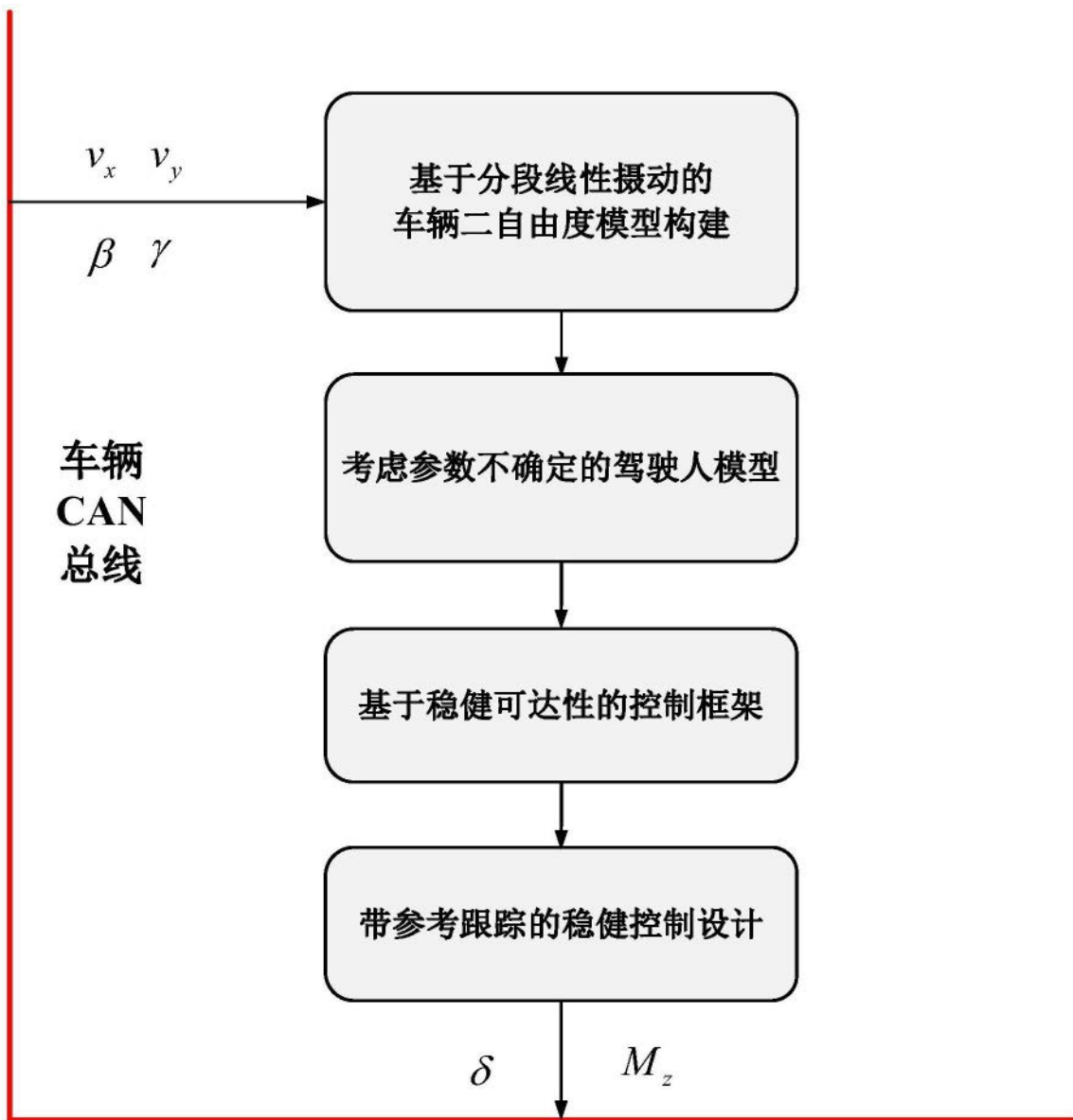


图1

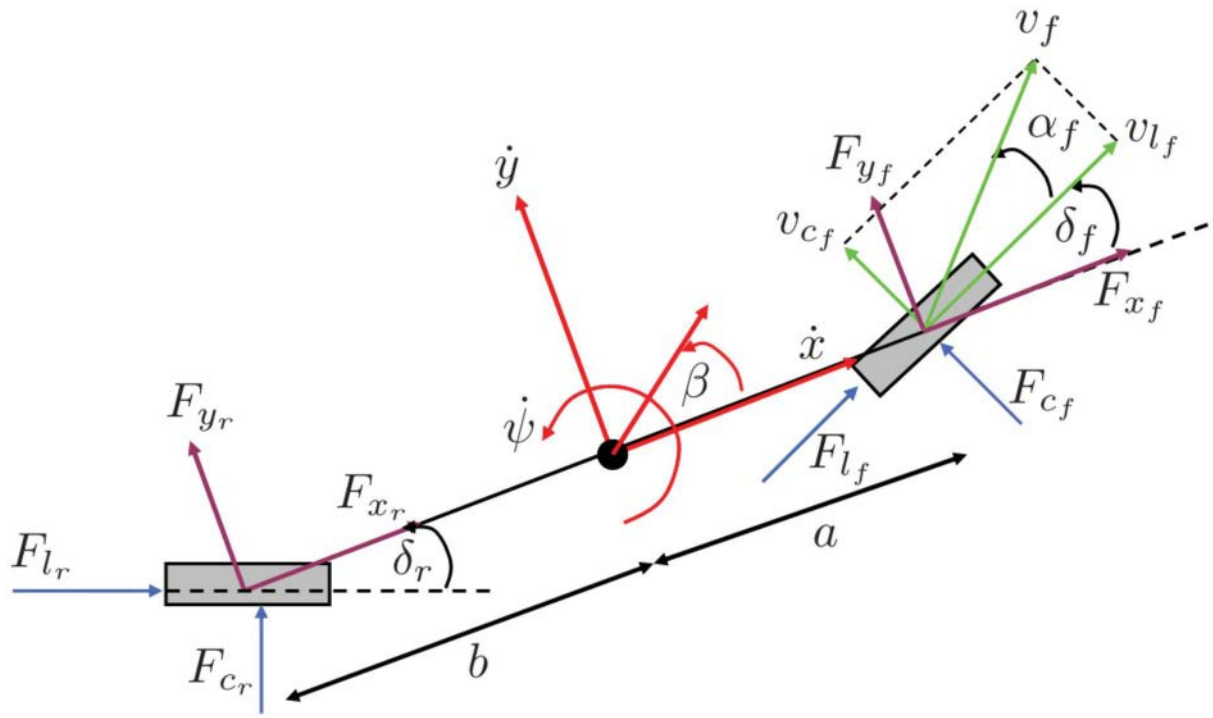


图2