

# 线控四轮独立驱动轮毂电机电动车集成控制

李刚<sup>1,2</sup>, 宗长富<sup>1</sup>, 陈国迎<sup>1</sup>, 洪伟<sup>1</sup>, 何磊<sup>1</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 辽宁工业大学汽车与交通工程学院, 辽宁锦州 121001)

**摘要:**从提高车辆操纵稳定性的角度,基于模型预测控制理论对线控四轮独立驱动轮毂电机电动车进行主动转向(AFS)、直接横摆力矩(DYC)和主动悬架(AS)的集成控制研究。采用分层集成控制结构,设计了模型预测控制器。研究了驱动力矩控制分配规则和AS控制方法,实现了AFS/DYC的水平集成控制和AFS/DYC/AS的全局集成控制,并通过仿真实验对算法进行了验证。仿真结果表明:集成控制算法能够实现车辆有效跟踪期望值,提高车辆极限工况的稳定性和主动安全性。

**关键词:**车辆工程;轮毂电机;电动车;模型预测控制;集成控制

**中图分类号:**U461.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2012)04-0796-07

## Integrated control for X-by-wire electric vehicle with 4 independently driven in-wheel motors

LI Gang<sup>1,2</sup>, ZONG Chang-fu<sup>1</sup>, CHEN Guo-ying<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, HE Lei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Automobile and Traffic Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** The integrated control for active steering (AFS), direct yaw moment (DYC) and active suspension (AS) of X-by-wire electric vehicle was studied based on the model predictive control theory to enhance the vehicle handling stability. Adopting the hierarchical integrated control structure, a model predictive controller was designed. The driving torque control allocation rules and AS control method were studied and the horizontal integrated control of AFS/DYC and the overall integrated control of AFS/DYC/AS were achieved. A simulation test was carried out to verify the proposed algorithm. The results show that the algorithm can make the vehicle follow the expectation effectively and enhance the vehicle stability in extreme conditions and its active safety.

**Key words:** vehicle engineering; in-wheel motor; electric vehicle; model predictive control; integrated control

迫于全球节能和环保趋势的压力,各种形式而采用轮毂电机的线控四轮独立驱动电动车成为电动汽车正在成为世界汽车工业的研发焦点,其中较为有前景的一种<sup>[1]</sup>。轮毂电机技术的不断

收稿日期:2011-08-11.

基金项目:吉林大学仿真与控制国家重点实验室开放基金项目(20111104);“863”国家高技术研究发展计划项目(2012AA110904);国家自然科学基金项目(50775096);辽宁工业大学校内基金项目(201108).

作者简介:李刚(1979-),男,讲师,博士研究生.研究方向:新能源汽车动态仿真及控制. E-mail:lnitligang@126.com

通信作者:宗长富(1962-),男,教授,博士生导师.研究方向:汽车动态仿真及控制. E-mail:cfzhong@yahoo.com.cn

发展,现已出现了集独立驱动/制动/悬架于一体的轮毂电机总成<sup>[2]</sup>,便于采用线控技术实现电动车线控驱动/转向/悬架的集成控制。四轮独立驱动轮毂电机电动车由于各个车轮转矩独立可控且响应快,相对于主动制动更容易实现直接横摆力矩控制(DYC),国内外均展开了该方面的研究<sup>[3-5]</sup>。主动前轮转向(AFS)作为线控转向的一个主要控制策略,在稳定性控制方面通过在汽车转向过程中叠加一个附加前轮转角来改变轮胎侧向力,产生补偿横摆力矩,保证汽车的稳定性<sup>[6]</sup>。AFS对汽车的稳定性控制要弱于DYC,但是AFS对车速影响较小,在驾驶舒适性方面具有优势,因此关于AFS与DYC的集成控制成为目前研究的重要课题<sup>[7-8]</sup>。线控悬架即主动悬架突破传统悬架系统在实际应用中的限制,可以提高不同行驶工况下的汽车平顺性和操纵稳定性<sup>[9-10]</sup>。当同一辆车上出现AFS、DYC、AS等多个子系统时,由于控制目标不一致会相互干涉与冲突,因此具有确保汽车各子系统之间协调工作、充分挖掘汽车性能潜力的汽车底盘集成控制已成为目前国内外研究热点<sup>[11]</sup>。

基于轮毂电机的线控四轮独立驱动电动车是实现线控汽车底盘集成控制的理想载体。本文从提高车辆极限工况稳定性角度,以线控四轮独立

驱动轮毂电机电动车为研究对象,研究了线控电动车AFS/DYC/AS的集成控制算法。文中确定了分层集成控制结构,基于模型预测控制理论设计了线控驱动/转向/悬架的模型预测控制器,针对线控悬架即主动悬架从提高车辆稳定性角度单独使用逻辑集成,同时研究了驱动力矩规则控制分配方法和悬架控制方法,并在所建立的多自由度车辆仿真模型上进行了集成控制算法仿真验证。

### 1 集成控制结构

本文集成控制算法采用如图1所示的分层集成控制结构,包括信号调理层、集成控制层、控制分配层、执行层4部分。信号调理层中的参考模型用来将驾驶员的驾驶操作和车辆外部状态“翻译”成对车辆的期望响应,即得到车辆的期望横摆角速度和质心侧偏角。集成控制层的模型预测控制器控制横摆角速度和质心侧偏角跟踪期望值,通过对横摆角速度和质心侧偏角的控制目标优化,决策出需要的前轮附加转角和附加横摆力矩。其中附加转角直接作用到底层执行器,而附加横摆力矩通过控制分配层的驱动力分配器按照一定的分配准则分配到4个车轮。

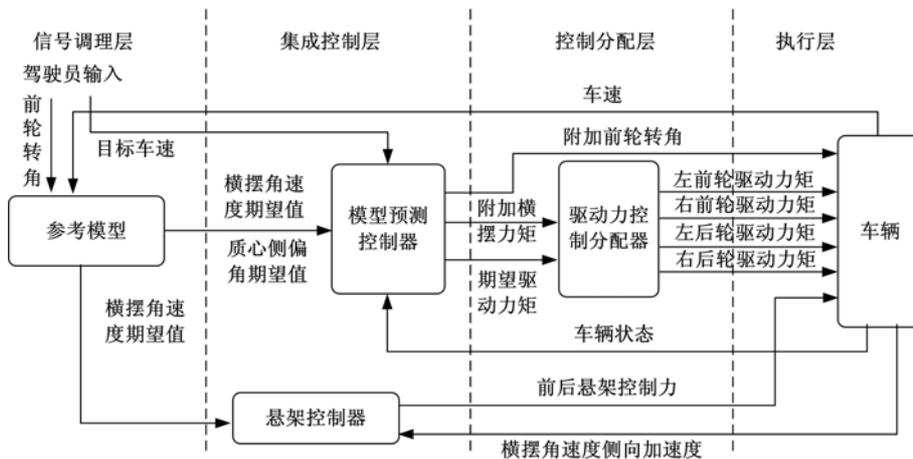


图 1 分层集成控制结构图

Fig. 1 Hierarchical integrated control structure

本文重点研究集成控制层和控制分配层,而且假设控制所需的车辆状态为已知,状态估计方面的内容可参考文献<sup>[12]</sup>。本文的集成控制分为水平集成和全局集成两类。水平集成控制只研究DYC/AFS集成,采用了模型失真有较好适应性的模型预测控制,设计了模型预测控制器。模

型预测控制器根据驾驶员操纵输入、车辆状态信息和参考值计算车辆的附加前轮转角、附加横摆力矩和期望驱动力矩,并通过驱动力控制分配器驱动力矩控制分配和前轮转角控制实现DYC/AFS集成控制。全局集成在水平集成的基础上,添加悬架的控制。本文主要以提高车辆极限工况

稳定性为目标,因此悬架集成采用逻辑集成控制,设计了悬架 PID 控制器,当侧向加速度超过一定限值时才启动主动悬架的侧向动力学控制,发挥悬架对车辆的侧倾控制和稳定性控制。

## 2 控制器设计

### 2.1 模型预测控制器

模型预测控制建立在预测模型、滚动优化、反馈修正三项基本原理的基础上<sup>[13]</sup>。控制器在每一个采样时刻都会用预测模型预测出系统在给定的预测范围内的未来被控输出。未来控制信号的计算是通过使未来过程尽可能地接近期望值(即参考轨迹)的优化求解得到。在下一采样时刻,优化重复进行,即滚动优化,对预测输出与参考轨迹的未来偏差序列的反馈校正又会得到在新的系统状态基础上的优化结果。本文采用的预测模型为含有附加横摆力矩的二自由度模型,控制输入为附加前轮转角和横摆力矩,被控输出量为横摆角速度和质心侧偏角。

#### 2.1.1 预测模型

由于车辆在运行过程中的不确定因素很多,即使采用鲁棒控制技术来包容侧偏刚度的时变性也不能保证任何工况都能符合实际,而采用非线性模型难以获得相应的模型参数。出于实现能力和实时控制需要,车辆控制器一般采用线性二自由度模型,该模型驾驶员转角输入下的运动即为集成控制的参考轨迹。本文采用如下有附加横摆力矩输入的二自由度车辆模型:

$$\begin{cases} (k_1 + k_2)\beta + \frac{1}{V_x}(ak_1 - bk_2)\gamma - k_1\delta_f = m(\dot{V}_y + V_x\gamma) \\ (ak_1 - bk_2)\beta + \frac{1}{V_x}(a^2k_1 + b^2k_2)\gamma - ak_1\delta_f + T_z = I_z\dot{\gamma} \end{cases} \quad (1)$$

状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}_c(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_2}{mV_x} & \frac{ak_1 - bk_2}{mV_x^2} - 1 \\ \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} & \frac{a^2k_1 + b^2k_2}{I_zV_x} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \frac{-k_1}{mV_x} & 0 \\ \frac{-ak_1}{I_z} & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}; \mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix}; \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \delta_f \\ \mathbf{M}_z \end{bmatrix}$$

式中:  $\delta_f$  为前轮转角;  $M_z$  为附加横摆力矩;  $\beta, \gamma$  分别为质心侧偏角和横摆角速度;  $k_1, k_2$  分别为前后轴侧偏刚度;  $V_x$  为纵向车速;  $I_z$  为横摆转动惯量;  $\mathbf{x}(t) \in R_{n_x}$  是  $n_x$  维状态变量;  $\mathbf{u}(t) \in R_{n_u}$  是  $n_u$  维控制输入;  $\mathbf{y}_c(t) \in R_{n_c}$  是  $n_c$  维被控输出变量,在这里  $n_x = n_u = n_c = 2$ 。

线性二自由度模型在稳定性控制方面存在一定的局限性,为此本文采用如图 2 所示的两级折线型轮胎模型。折线型轮胎模型用两段直线描述轮胎。当侧偏角在近似线性区时,用线性轮胎描述,当侧偏角进入强非线性时,侧偏刚度设定为 0。

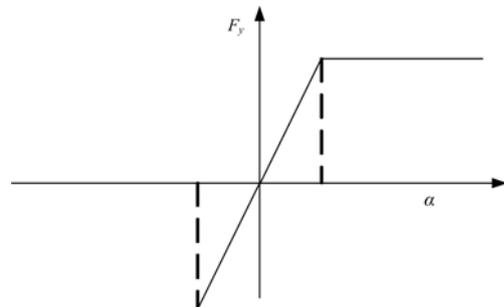


图 2 两级折线型轮胎模型  
Fig. 2 Two line-type tire model

当车辆处于附着极限时,参考模型的输出值被边界值代替。横摆角速度和质心侧偏角的边界值可以通过经验公式<sup>[14]</sup>得到:横摆角速度的边界值  $|\gamma_d| = 0.85 \frac{\mu g}{V_x}$ ; 质心侧偏角的边界值  $|\beta_d| \leq \tan^{-1}(0.02\mu g)$ 。

#### 2.1.2 控制器算法

模型预测控制属于离散控制,所以首先对式(2)进行离散化,得到:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}_c(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  为离散阵,为了减少或消除静态误差,改写成增量模型,  $\mathbf{C}$  为单位阵,可以省略不写。

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}_c(k) = \Delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{y}_c(k-1) \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1) \\ \Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1) \end{cases} \quad (5)$$

按照预测控制的基本原理,首先以最新测量

值作为初始条件,基于预测模型对未来动态进行预测。设定预测时域为  $p$ ,控制时域为  $m$ ,且  $m < p$ 。本文  $m = 2$ ,预测时域  $p = 10$ 。

定义  $k$ 时刻对  $k+i$ 时刻的状态预测为  $x(k+i|k)$ ,符号“|”后面的  $k$ 表示当前时刻为  $k$ 。控制增量为  $\Delta u(k+i)$ ,输出为  $y_c(k+i|k)$ 。并作如下的假设:控制时域之外,控制量不变,即  $\Delta u(k+i) = 0, i \geq m$ ;定义如下向量:

$$\mathbf{Y}_p(k+1|k) = \begin{bmatrix} y_c(k+1|k) \\ y_c(k+2|k) \\ \vdots \\ y_c(k+p|k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

对于系统未来  $p$ 步输出的预测可由如下预测方程计算:

$$\mathbf{Y}_p(k+1|k) = \mathbf{S}_x \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{I} \mathbf{y}_c(k) + \mathbf{S}_u \Delta \mathbf{u}(k) \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^2 + \mathbf{A} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p \mathbf{A}^i \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n_c \times n_c} \\ \mathbf{I}_{n_c \times n_c} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{n_c \times n_c} \end{bmatrix};$

$$\mathbf{S}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_u & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \sum_{i=1}^2 \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B} & \mathbf{B}_u & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B} & \sum_{i=1}^{m-1} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B} & \cdots & \cdots & \mathbf{B}_u \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^p \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B} & \sum_{i=1}^{p-1} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B} & \cdots & \cdots & \sum_{i=1}^{p-m+1} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B} \end{bmatrix}_{(n_c \times p) \times (n_c \times m)}$$

在上面预测结果的基础上,求解下面的优化问题:

$$\min_{\Delta \mathbf{U}(k)} J = \sum_{i=1}^p \|\Gamma_{y,i}(y_c(k+i|k) - r(k+i))\|^2 + \sum_{i=1}^m \|\Gamma_{u,i} \Delta u(k+i-1)\|^2 \quad (9)$$

写成矩阵向量的形式,则

$$J = \|\Gamma_y(\mathbf{Y}_p(k+1|k) - \mathbf{R}(k+1))\|^2 + \|\Gamma_u \Delta \mathbf{U}(k)\|^2 \quad (10)$$

式中:  $\Gamma_y = \text{diag}(\Gamma_{y,1}, \Gamma_{y,2}, \dots, \Gamma_{y,p})$ 为输出偏差的惩罚系数矩阵;  $\Gamma_u = \text{diag}(\Gamma_{u,1}, \Gamma_{u,2}, \dots, \Gamma_{u,m})$ 为控制增量的惩罚系数矩阵;  $\mathbf{R}(k+1)$ 是预测时域内的期望输出值,即参考模型输出的横摆角速度和质心侧偏角,  $\mathbf{R}(k+1) = [r(k+1) \ r(k+2) \ \dots \ r(k+p)]^T$ 。在这里假定在预测时域内,期望值是一定的,且等于当前值,即  $r(k+i) = r(k)$ ,求解方程  $\partial J / (\partial \Delta \mathbf{U}) = 0$ ,得到最优控制输出序列为:

$$\Delta \mathbf{U}^*(k) = (\mathbf{S}_u^T \Gamma_y^T \Gamma_y \mathbf{S}_u + \Gamma_u^T \Gamma_u)^{-1} \mathbf{S}_u^T \Gamma_y^T \Gamma_y \mathbf{E}_p(k+1|k) \quad (11)$$

其中控制偏差可以在线计算:

$$\mathbf{E}_p(k+1|k) = \mathbf{R}(k+1) - \mathbf{S}_x \Delta \mathbf{x}(k) - \mathbf{I} \mathbf{y}_c(k) \quad (12)$$

通过合理调整集成控制中的惩罚系数,优化控制器可以按照控制算法设计者的设计要求更好地进行优化计算。本文经过大量仿真实验,最终采用如下的集成控制惩罚系数:

$$\Gamma_{y,i} = \text{diag}([5000, 3000]), \Gamma_y = \text{diag}(\Gamma_{y,1}, \Gamma_{y,2}, \dots, \Gamma_{y,p}), \Gamma_u = \text{diag}([0.001, 0.05, 0.001, 0.05])。$$

### 2.2 驱动力控制分配器

通过集成控制层计算出稳定车辆所需的横摆力矩值、附加转角和驱动力矩,最终通过驱动力控制分配实现。本文将模型预测控制器计算出的附加转角直接作为底层转向控制的目标输入,附加横摆力矩控制通过规则驱动力控制分配实现。

各轮的轮胎纵向驱动力  $F_{xi}$  可通过轮毂电机输出转矩控制:

$$F_{xi} = T_{xi} / r_i \quad (13)$$

$$T_{x1} + T_{x2} + T_{x3} + T_{x4} = T_{xreq} \quad (14)$$

式中:  $T_{xi}$ 为电机输出转矩;  $r_i$ 为车轮滚动半径;  $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示左前轮、右前轮、左后轮、右后轮;  $T_{xreq}$ 为集成控制层计算出的目标驱动力矩。

附加横摆力矩可通过纵向驱动力控制实现。附加横摆力矩  $\mathbf{M}_z$ 用控制输入的纵向驱动力表示成如下形式:

$$\mathbf{M}_z = \mathbf{B} [F_{x1} \ F_{x2} \ F_{x3} \ F_{x4}]^T, \mathbf{F}_{xi} \geq 0 \quad (15)$$

其中作用阵:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{\omega}{2}\cos(\delta_i) + a \cdot \sin(\delta_i) \\ \frac{\omega}{2}\cos(\delta_i) + a \cdot \sin(\delta_i) \\ -\frac{\omega}{2} \\ \frac{\omega}{2} \end{bmatrix}^T$$

首先,根据附加横摆力矩  $M_x$ 、横摆角速度期望值  $\gamma_d$ ,使用下面的准则进行转向不足和转向过度判定: $M_x > 0$  且  $\gamma_d > 0$  时,车辆处于左转转向不足的工况; $M_x > 0$  且  $\gamma_d < 0$  时,车辆处于右转转向过度的工况;当  $M_x < 0$  且  $\gamma_d > 0$  时,车辆处于左转转向过度的工况;当  $M_x < 0$  且  $\gamma_d < 0$  时,车辆处于右转转向不足的工况。然后,根据如下规则进行横摆力矩控制分配:当需要纠正左转向不足或者右转向过度工况时,右侧车轮增加驱动力矩均产生正的 1/4 附加横摆力矩值,左侧车轮减少驱动力矩均产生负的 1/4 附加横摆力矩值;当需要纠正左转向过度或者右转向不足工况时,左侧车轮增加驱动力矩均产生正的 1/4 附加横摆力矩值,右侧车轮减少驱动力矩均产生负的 1/4 附加横摆力矩值。

### 2.3 悬架控制器

线控悬架控制通过对垂直载荷转移分配控制,改变前后轴侧偏刚度,即需要增加车辆不足转向时,使前轴转移载荷量增大和后轴转移量减少,如果减少不足转向则反之,同时将车辆侧倾角控制在合理范围内,辅助 DYC/AFS 实现更有效的稳定性控制。由悬架侧倾动力学准静态方程

$$a_y m_s h = (K_{\phi_l} + K_{\phi_r})\phi + \Delta F_{sf}\omega + \Delta F_{sr}\omega \quad (16)$$

可知,汽车转向过程可能转移的最大载荷为  $a_y m_s h_{roll}/\omega$ ,其中,  $a_y$  为侧向加速度,  $h$  为质心至侧倾轴距离;  $K_{\phi_i}$  为被动悬架轴侧倾角刚度;  $\Delta F_{si}$  为悬架载荷转移控制力;  $\omega$  为轮距。悬架载荷转移控制力必须小于直线行驶时轴单侧的载荷,即

$$\begin{aligned} 0 \leq \Delta F_{sf} \leq F_{\phi 1}/2 \\ 0 \leq \Delta F_{sr} \leq F_{\phi 2}/2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $F_{\phi 1}, F_{\phi 2}$  分别为车辆直线行驶时前、后轴垂直载荷;  $\Delta F_{sf}, \Delta F_{sr}$  分别为前、后轴悬架载荷转移控制力;  $k_1, k_2$  分别为前、后轴侧偏刚度。

悬架载荷转移控制力记为  $\Delta F_s$ , 则有以下约束关系:

$$\Delta F_s = \Delta F_{sf} + \Delta F_{sr} \leq a_y m_s h / \omega \quad (18)$$

$$\max\left\{\Delta F_s - \frac{F_{sr}}{2}, 0\right\} \leq \Delta F_{sf} \leq \min\left\{\frac{F_{sf}}{2}, \Delta F_s\right\} \quad (19)$$

悬架控制器采用 PID 控制,以横摆角速度实际值和横摆角速度期望值偏差  $\Delta r$  作为控制输入,控制输出  $u$  为在合理界限值范围内的前轴悬架载荷转移控制力。通过前轴悬架载荷转移控制力进而得到悬架载荷转移控制力,原理如图 3 所示。

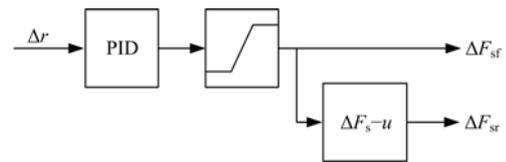


图 3 悬架控制器原理图

Fig. 3 Suspension controller schematic

### 3 车辆仿真模型与仿真验证

本文应用 Matlab/Simulink 建立了 15 自由度非线性车辆模型。仿真模型具有车身平动、转动 6 个自由度,悬架的 4 个垂向自由度和车轮 4 个转动自由度以及前轮转角自由度,采用瞬态 Magic-formula 轮胎模型。本文重点研究集成控制算法的有效性,所以将电机模型简化为驱动力矩输入,将线控转向系统简化为前轮转角输入。该车辆模型能很好地反映车辆的动态特性,便于加入控制算法和进行控制效果评价。表 1 为所选取的车辆模型部分参数。

表 1 车辆模型部分参数表

Table 1 Part of the vehicle model parameters table

参 数	数 值
总质量 $m$ /kg	825
质心高度 $h$ /m	0.45
质心至前轴的距离 $a$ /m	1.110
质心至后轴的距离 $b$ /m	1.25
侧倾转动惯量 $I_x$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	288
横摆转动惯量 $I_z$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	1210
前轴侧偏刚度 $k_1$ /( $\text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$ )	$-1.33 \times 10^5$
后轴侧偏刚度 $k_2$ /( $\text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$ )	$-1.21 \times 10^5$

为了验证算法的有效性,本文采用美国国家公路交通安全管理局设计的 fishhook 试验作为验证手段。仿真环境如下:车辆以 80 km/h 的速度在附着系数为 0.8 的路面上匀速行驶,输入如图 4 所示的前轮转角输入信号,仿真结果如图 5~11 所示。

从仿真结果可以看出,在急剧转向时,水平集成控制和全局集成控制可以较好地减少车辆急剧

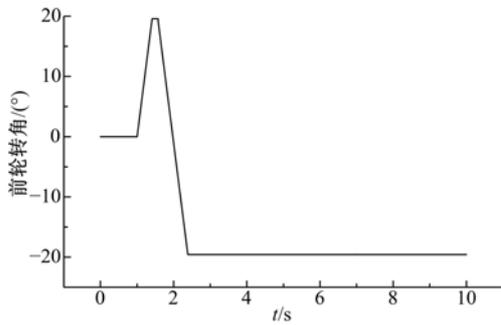


图 4 前轮转角输入曲线

Fig. 4 Curve of front wheel angle input

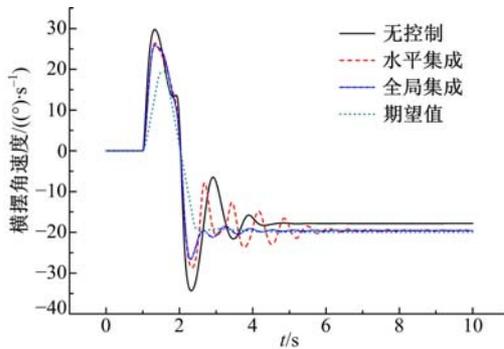


图 5 横摆角速度曲线

Fig. 5 Curve of yaw velocity

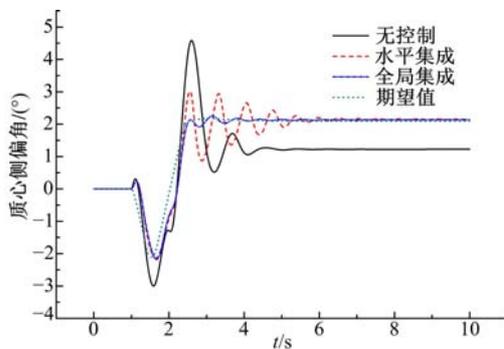


图 6 质心侧偏角曲线

Fig. 6 Curve of CG sideslip angle

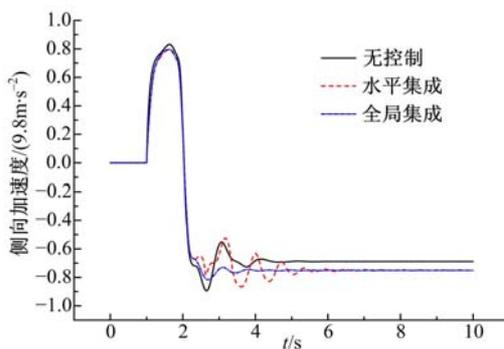


图 7 侧向加速度

Fig. 7 Curve of lateral acceleration

转向时的超调和抖动,有效地跟踪了横摆角速度

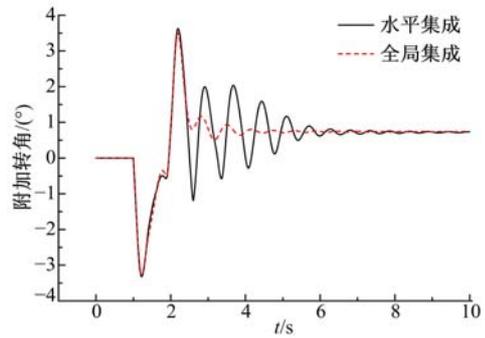


图 8 附加转角曲线

Fig. 8 Curve of additional front wheel angle

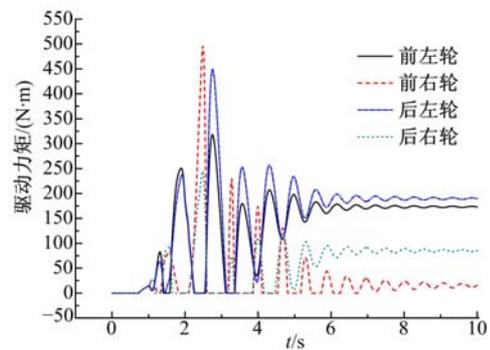


图 9 水平集成控制驱动力矩曲线

Fig. 9 Curve of horizontal integrated control driving torque

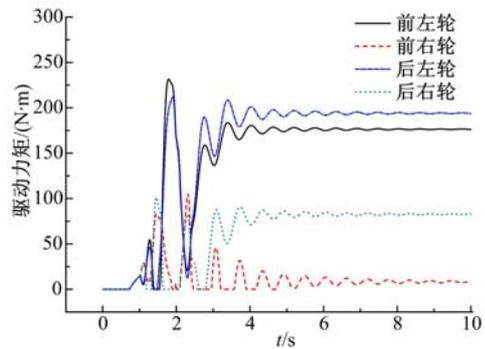


图 10 全局集成控制驱动力矩曲线

Fig. 10 Curve of overall integrated control driving torque

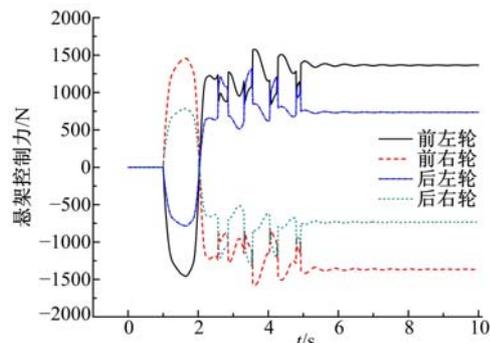


图 11 悬架控制力曲线

Fig. 11 Curve of suspension control force

期望值和质心侧偏角期望值,如图 5、图 6 所示。由于车辆急剧转向瞬间,质心侧偏角变化较大,因此集成控制以偏重于理想质心侧偏角跟踪控制为主,如图 6 所示。而全局集成控制要比水平集成控制更进一步减小跟踪误差,更具有控制潜力。该试验可以使车辆的侧向加速度达到较高的水平,如图 7 所示。全局集成控制的附加转角、驱动力矩值均比只有水平集成控制时要小,如图 8、图 9、图 10 所示,提高了车辆稳定裕度。这是由于对悬架力进行了控制,如图 11 所示。

## 4 结 论

(1)针对线控四轮独立驱动轮毂电机电动车,基于模型预测控制理论研究了 AFS/DYC 的水平集成控制和 AFS/DYC/AS 的全局集成控制,有效提高了车辆的稳定性和主动安全性。

(2)模型预测控制方法通过调整控制变量和输入变量权重,能够在线实时对未来过程进行预测优化,使汽车在急剧转向时横摆角速度与质心侧偏角都能在理想范围内。

(3)采用线控悬架逻辑集成的全局集成控制相对于水平集成控制使车辆能更好跟踪期望值,提高车辆极限工况下的稳定裕度和安全性能。

### 参考文献:

- [ 1 ] Satoshi Murata. Innovation by in-wheel-motor drive unit[C]//AVEC10, 2010.
- [ 2 ] Michelins-active-wheel-technology-in-detail [ DB/OL]. [http://www.motorauthority.com/news/1030025\\_2010](http://www.motorauthority.com/news/1030025_2010).
- [ 3 ] Geng Cong, Mostefai Lotti, Denai Mouloud, et al. Direct yaw-moment control of an in-wheel-motored electric vehicle based on body slip angle fuzzy observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1411-1419.
- [ 4 ] 余卓平,姜炜,张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车扭矩分配控制[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008,36(8):1115-1119.  
Yu Zhuo-ping, Jiang Wei, Zhang Li-jun. Torque distribution control for four wheel in wheel motor electric vehicle[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008,36(8): 1115-1119.
- [ 5 ] 邹广才,罗禹贡,李富强. 四轮独立电驱车辆全轮纵向力优化分配方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(5):719-722,727.  
Zou Guang-cai, Luo Yu-gong, Li Ke-qiang. Tire longitudinal force optimization distribution for independent 4WD EV [J]. Tsinghua University: Sci & Tech, 2009, 49(5): 719-722,727.
- [ 6 ] 郑宏宇. 汽车线控转向路感模拟与主动转向控制策略研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2009.  
Zheng Hong-yu. Research on road feeling and active steering control strategy for vehicle steer-by-wire system[D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2009.
- [ 7 ] Masao Nagai. The perspectives of research for enhancing active safety based on advance control technology[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(5): 413-431.
- [ 8 ] Yang Xiu-jian, Wang Zeng-cai, Peng Wei-li. Coordinated control of AFS and DYC for vehicle handling and stability based on optimal guaranteed cost theory[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(1): 57-79.
- [ 9 ] Youn J I M, Tomizuka M. Level and attitude control of the active suspension system with integral and derivative action [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44 (9):659-674.
- [10] Wang Jun, Shen Shui-wen. Integrated vehicle ride and roll control via active suspension[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46 (1):495-508.
- [11] 李道飞. 基于轮胎力最优分配的车辆动力学集成控制研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力学院, 2008.  
Li Dao-fei. Study on integrated vehicle dynamics control based on optimal tire force distribution[D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [12] 宗长富,胡丹,杨肖,等. 基于扩展卡尔曼滤波的汽车行驶状态估计[J]. 吉林大学学报:工学版,2009, 39(1):7-11.  
Zong Chang-fu, Hu Dan, Yang Xiao, et al. Vehicle driving state estimation based on extended kalman filter[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009,39(1):7-11.
- [13] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- [14] Rajesh Rajamani. Vehicle Dynamics and Control [M]. New York: Springer, 2006.