

Active Front Wheel Steering System based on robust control

Yang Fan¹, Zhou Bing^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, 2.Institute of Space Technology, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Steering system as an important component of the vehicle, directly impacted on vehicle handling stability and driving safety. The research of active front wheel steering technology had the vital significance to the development of vehicles initiative safety. The two degree-of-freedom vehicle mathematical model was established, uncertainty parameters including road adhesion coefficient, front and rear wheel cornering stiffness and side wind disturbance were considered, the active front wheel steering robust controller based on yaw rate feedback was designed, and simulated by MATLAB software, finally indicated that this controller effectively improved the vehicles handling and stability, and enhanced driving safety.

Keywords: active front wheel steering, robust control, simulation

基于鲁棒控制的主动前轮转向系统

杨凡¹, 周兵^{1,2}

(1.湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 2.航天技术研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 转向系统作为车辆的重要组成部分之一, 直接影响到车辆的操纵稳定性和行驶安全性。主动前轮转向技术的研究对车辆主动安全技术的发展有重要的意义。建立车辆的二自由度数学模型, 考虑路面附着系数, 轮胎侧偏刚度等参数不确定性及侧向风干扰作用, 设计主动前轮转向系统基于横摆角速度反馈的鲁棒控制器。利用 MATLAB 进行仿真分析, 结果表明, 该控制器有效地改善了车辆操纵稳定性, 提高了车辆行驶安全性。

关键词: 主动前轮转向, 鲁棒控制, 仿真

1 引言

转向系统作为车辆的重要组成部分之一, 直接影响到车辆的操纵稳定性和行驶安全性。车辆转向系统的发展可以分为简单的机械转向系统、液压助力转向系统、电控液压助力转向系统以及电动助力转向系统、主动转向和线控转向等阶段^[1]。主动前轮转向系统(AFS)通过主动改变驾驶员给定的转向盘转角, 使得车辆的响应尽可能的与理想的车辆响应特性相一致, 能在危险工况下通过独立于驾驶员的转向干预来稳定车辆。目前这项技术已应用于部分实车, 如德国宝马公司和 ZF 公司联合开发的主动前轮转向系统, 已装备在部分宝马轿车上。主动转向技术的出现, 为车辆电子控制技术和主动安全系统的发展开辟了一块新的领域。

主动前轮转向系统的核心在于通过对前轮施加一个不依赖于驾驶员转向盘输入的附加转角来提高车辆的操纵性、稳定性和轨迹保持性能^[1], 其优点在于可产生横向力来抵消车辆在分离附着系数路面、左右车轮纵向力不对称、大侧风作用等所产生的横摆和侧倾干扰力矩, 改善车辆的抗倾覆能力, 与 ESP 等电子稳定系统结合可以进一步改善车辆的操纵稳定性^[2]。本文主要设计主动前轮转向的鲁棒控制系统, 对车辆在低附着系数路面和侧风干扰等工况行驶时的操纵稳定性进行仿真分析。

2 车辆动力学模型

为分析整车的操纵稳定性特性, 将车辆简化为二自由度模型, 该模型中考虑了侧向风的作用, 如图 1 所示。该模型中忽略了悬架的作用, 认为汽车仅作平行于地面的平面运动, 汽车沿 x 轴的前进速度 v 不变, 不考虑车轮由于载荷的变化引起的轮胎特性的变化, 忽略转向系统的影响, 直接以前轮转角 δ_f 作为输入^[3]。

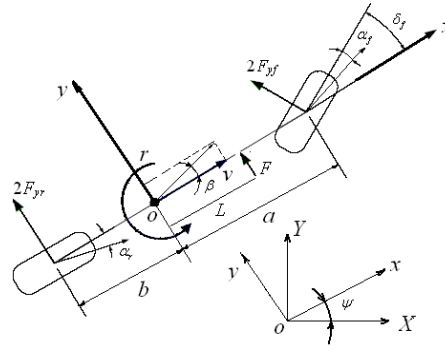


图1 二自由度车辆动力学模型

根据力和力矩的平衡原理，可以得到车辆的运动微分方程为

$$\begin{cases} mv(\dot{\beta} + r) = 2F_{yf} + 2F_{yr} + F \\ I_z \dot{r} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr} + LF \end{cases} \quad (1)$$

其中， β 为车辆质心处的侧偏角， r 为车辆横摆角速度， I_z 为整车绕 Z 轴转动惯量， m 为整车质量， F_{yf} 为前轮的侧向力， F_{yr} 为后轮的侧向力， F 为侧向风干扰力， L 为侧向风作用点到质心的距离， a 为质心至前轴距离， b 为质心至后轴距离。

为计算轮胎的侧向力需采用相应的轮胎模型，比较常用的 Magic Formula 稳态轮胎模型，其形式如下^[4]：

$$F_{yi} = D_y \sin\{C_y \arctan[B_y(1 - E_y)\alpha_i + E_y \arctan(B_y\alpha_i)]\}, \quad i = f, r \quad (2)$$

式中 D_y 、 C_y 、 B_y 、 E_y 分别为轮胎侧向力-侧偏角曲线的峰值因子、形状因子、刚度因子和曲率因子，与轮胎特征和路面附着状况有关。如果需要考虑路面的附着系数 μ 对轮胎侧向力的影响，则可以将上式改写为^[4]

$$F_{yi} = \mu D_y \sin\{(\frac{5}{4} - \frac{\mu}{4})C_y \arctan[(2 - \mu)B_y\alpha_i(1 - E_y) + E_y \arctan((2 - \mu)B_y\alpha_i)]\} \quad (3)$$

在处理车辆操纵稳定性问题时，一般假设车轮处于小侧偏角工况，轮胎侧向力为线性的，即

$$F_{yi} = C_i \alpha_i, \quad i = f, r$$

C_i 为轮胎侧偏刚度， α_i 为轮胎侧偏角，则(1)式可以写成状态方程形式

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2(C_f + C_r)}{mv} & \frac{2(aC_f - bC_r)}{mv^2} - 1 \\ \frac{2(aC_f - bC_r)}{I_z} & \frac{2(a^2C_f + b^2C_r)}{I_z v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{mv} & -\frac{2C_f}{mv} \\ \frac{L}{I_z} & -\frac{2aC_f}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ \delta_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

考虑轮胎参数的不确定性和路面的变化，建立轮胎的侧偏刚度的倍增扰动模型^[2]

$$\begin{cases} C_f = C_{f0}(1 + E_f \Delta_1) & \|\Delta_1\| \leq 1 \\ C_r = C_{r0}(1 + E_r \Delta_2) & \|\Delta_2\| \leq 1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中， C_{f0} 、 C_{r0} 为前后轮名义侧偏刚度值， E_f 、 E_r 分别为前后轮侧偏刚度的误差， Δ_1 、 Δ_2 为扰动值。

定义虚构输入向量 $p = [p_f \quad p_r]^T$ ，输出向量 $q = [q_f \quad q_r]^T$ ，且 $p = \Delta q$ ， $\Delta = \text{diag}[\Delta_1 \quad \Delta_2]$ ，

$$\begin{cases} q_f = \beta + \frac{ar}{v} - \delta_f \\ q_r = \beta - \frac{br}{v} \end{cases} \quad (6)$$

则可以建立 LFT 车辆模型

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ q \\ y \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} x \\ p \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ p \\ u \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $x = [\beta \quad r]^T$ ， $u = [F \quad \delta_f]^T$ ， $y = r$ ，

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} \frac{2E_f C_{f0}}{mv} & \frac{2E_r C_{r0}}{mv} \\ \frac{2aE_f C_{f0}}{I_z} & -\frac{2bE_r C_{r0}}{I_z} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{mv} & -\frac{2C_{f0}}{mv} \\ \frac{L}{I_z} & -\frac{2aC_{f0}}{I_z} \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & a/v \\ 1 & -b/v \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{11}, D_{21}, D_{22} \text{ 均为空矩阵。}$$

$$a_{11} = \frac{2(C_{f0} + C_{r0})}{mv}, a_{12} = \frac{2(aC_{f0} - bC_{r0})}{mv^2} - 1, a_{21} = \frac{2(aC_{f0} - bC_{r0})}{I_z}, a_{22} = \frac{2(a^2C_{f0} + b^2C_{r0})}{I_z v}。$$

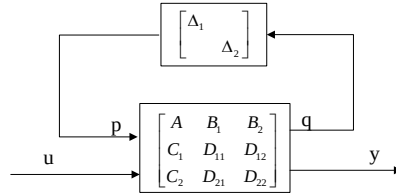


图2 LFT 车辆模型

3 鲁棒控制系统设计

由于车辆的质心侧偏角信号难以测量，现有的车辆稳定性控制系统主要是以横摆角速度反馈来实现，本文中的主动前轮转向系统也是根据车辆的横摆角速度信号来进行控制。该控制系统的原理见图3所示，图中 G_0 为以干路面上名义侧偏刚度建立的参考模型， G 为广义车辆模型， y 为实际车辆模型横摆角速度与参考模型横摆角速度之差， K 为反馈控制器， δ_w 为驾驶员的输入，前轮转向角 δ_f 由驾驶员输入转角与主动转向系统控制转角的叠加组成，

$$\delta_f = \delta_w + \delta_u = \delta_w + K(r_{ref} - r) \quad (9)$$

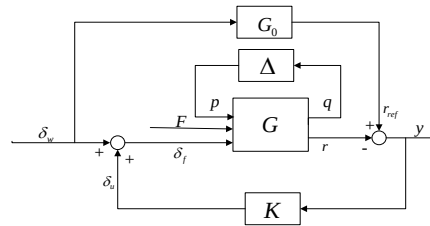


图3 主动前轮转向鲁棒控制系统原理框图

主动前轮转向鲁棒控制系统的目标是消除侧向风等引起的对车辆横摆角速度的干扰，使其能很好地跟踪名义参考模型的横摆角速度响应。将该问题转化为标准 H_∞ 控制问题，标准 H_∞ 控制问题描述如图4所示，其中 w 为外部输入信号， z 为受控输出信号， y 为测量输出信号， u 为控制信号， G 、 K 分别表示广义的受控对象和控制器。利用MATLAB中的鲁棒控制工具箱，经反复计算选择合理的加权函数 W_1 、 W_2 ，

$$\left\| \begin{bmatrix} W_1(I + GK)^{-1} \\ W_2K(I + GK)^{-1} \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1, \text{ 求出 } H_\infty \text{ 控制器 } K。$$

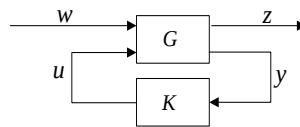


图4 标准鲁棒控制问题框图

4 仿真结果与分析

对车辆在低附着系数路面上进行转向盘角阶跃输入的工况进行仿真分析。车速为 $v=20\text{m/s}$ ，驾驶员输入转角为一个阶跃信号，路面附着系数 $\mu=0.5$ 。图5为转向角阶跃输入下车辆的相关响应曲线。从图5(a)、(b)可以看出采用主动前轮转向系统的车辆侧偏角和横摆角速度都能很好的跟踪参考模型的响应，而未加控制的车辆在转向后期已经失稳。

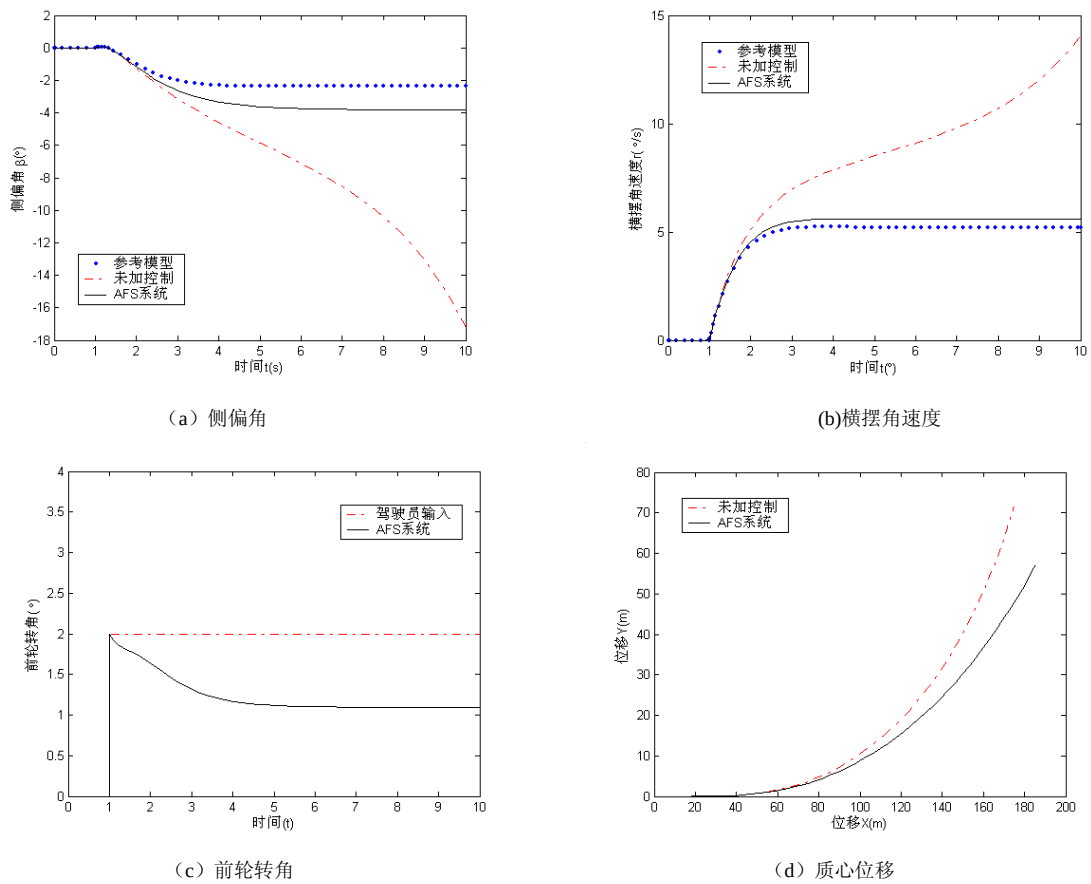
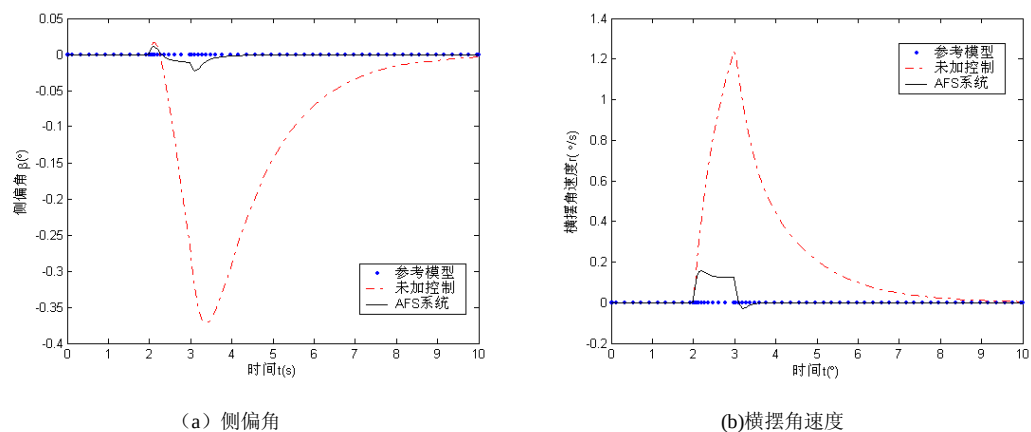


图5 车辆角阶跃输入工况

对车辆突然受到大的侧向风作用的工况进行仿真分析,车速为 $v=30\text{m/s}$,路面附着系数 $\mu=1$,假定车辆突然受到 $F=2000\text{N}$ 的侧向风干扰,作用时间从 2s 开始,3s 结束,且驾驶员未对侧向风干扰做出响应,即驾驶员输入转角为 0。图 6 为侧向风干扰下车辆的相关响应曲线。从图 6(a)、(b)可以看出采用主动前轮转向系统的车辆在侧向风干扰下,侧偏角和横摆角速度均能很快达到稳定。



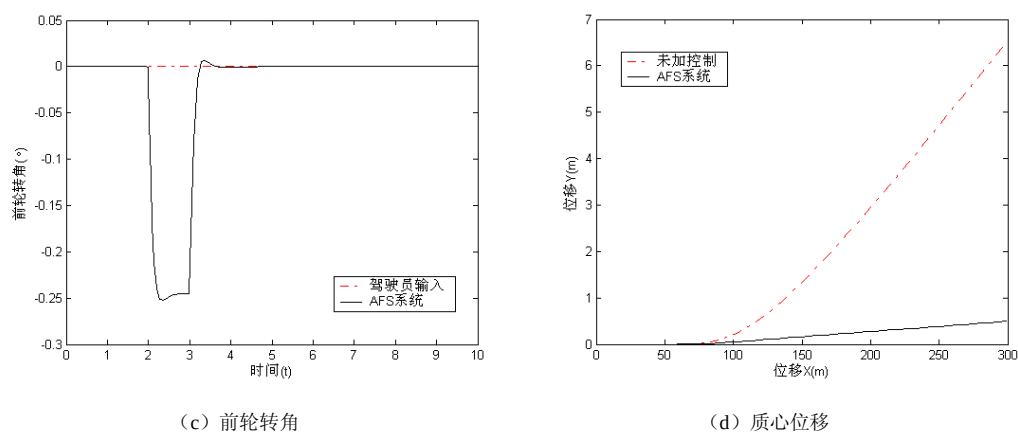


图6 侧向风干扰工况

从以上仿真结果可以看出,采用鲁棒控制的主动前轮转向系统的车辆可以很好的跟踪参考模型的横摆角速度响应,对于前后轮侧偏刚度的参数摄动以及侧向风干扰等都具有良好的鲁棒性,有效地改善了车辆的操纵稳定性,提高了车辆行驶安全性。

参考文献

- [1] 高晓杰,余卓平,张立军等.机械式前轮主动转向系统的原理与应用[J].汽车工程,2006,28(10):918~912.
- [2] 余卓平,赵治国,陈慧.主动前轮转向对车辆操纵稳定性的影响[J].中国机械工程,2005,16(7):652~657.
- [3] 余志生.汽车理论[M].机械工业出版社,北京,2000.
- [4] Said Mammar, Damien Koenig. Vehicle Handling Improvement by Active Steering [J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(3):212~238.
- [5] Nan Yu. Yaw-Control Enhancement for Buses by Active Front-Wheel Steering [D].2007.
- [6] 陈德玲,殷承良,陈俐.基于状态观测器的主动前轮转向研究[J].中国机械工程,2007,18(24):3019~3023.