

文章编号:1671-6833(2008)01-0083-05

## 汽车超车并行工况下侧向避撞控制策略研究

赵伟<sup>1,2</sup>, 魏朗<sup>1</sup>, 张犇<sup>1</sup>

(1. 长安大学汽车学院, 陕西西安 710064; 2. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 河南洛阳 471003)

**摘要:** 汽车在高速行驶过程中进行超车时, 在两车并行工况下容易出现侧向碰撞。提出了利用主动转向技术, 根据超车时两车侧向距离的变化控制并行车辆, 使两车侧向距离满足安全要求, 避免由于两车侧向间距的变化而引起的交通事故, 减小汽车超车时发生侧向碰撞的可能。确立了相应的控制目标和控制策略, 建立了基于车间距及其变化率的模糊控制模型, 设计了模糊控制器并进行了复杂工况下的仿真试验。结果表明: 利用主动转向模糊控制技术, 能减少汽车在高速超车时两车发生侧向碰撞的危险, 使汽车在高速行驶过程中具有更好的安全性。

**关键词:** 汽车; 模糊控制; 主动转向; 侧向避撞

**中图分类号:** U 461.1

**文献标识码:** A

### 0 引言

汽车在高速行驶过程中进行超车时, 两车处于并列行驶状态, 这是一种危险的工况。由于速度较高, 若并行中的一车突然偏离行驶车道或进行非正常转向, 则两车容易出现侧向碰撞事故。

在我国汽车碰撞交通事故中, 侧面碰撞事故占 30% 左右, 汽车侧向避撞系统作为未来智能交通和汽车主动安全技术发展的一个重要方面, 已受到研究人员更多的重视。国外已有一些研究机构在此方面获得了一些研究成果, 相应的在侧向车辆感知和避撞控制系统等方面也进行了一些研究。国内对于侧向避撞系统的研究目前尚未有相关的规定, 许多汽车企业对汽车行驶过程中的侧向碰撞事故也未进行更多的相关研究, 且国内相关文献的研究重点在汽车行驶过程中纵向车间距的保持问题和汽车侧向碰撞后结构性能的研究方面, 对于汽车并行过程中如何进行侧向避撞的问题研究较少<sup>[1-4]</sup>。因此开展汽车的侧向避撞研究十分重要。

笔者针对汽车在超行车并行时容易出现的侧向碰撞问题, 根据两车并行时其侧向间距及其变化率的大小, 提出了基于主动转向技术的汽车侧向避撞模糊控制策略, 利用模糊控制技术所具有

的对非线性系统的控制特性和鲁棒性, 设计了模糊控制器进行仿真试验。结果表明: 所提出的控制策略和控制模式是有效可行的, 能在一定程度上避免两车并行时出现侧向碰撞。

### 1 动力学模型的建立

#### 1.1 汽车模型

汽车在超车过程中两车并行示意图如图 1 所示, 图中两车结构和性能相同, 因此两车采用相同的数学模型, 左侧车为超越车(1 车), 右侧车为被超越车(2 车), 假设超车时两车速度相同。 $\delta_1, \delta_2$  分别为超越车和被超车前轮转角;  $\alpha_{1f}, \alpha_{1r}$  分别为超越车前、后轮侧偏角;  $L$  为两车侧向距离。不计汽车侧倾、空气阻力和车轮滚动阻力等的影响, 只考虑汽车沿  $y$  轴平移和绕  $z$  轴横摆 2 个自由度的运动, 根据图 1 建立车辆运动方程<sup>[2,5]</sup>:

$$m(\ddot{u}_y + u_x \omega_r) = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta + F_{y3} + F_{y4} \quad (1)$$

$$I_z \dot{\omega}_r = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta \cdot l_1 + (F_{y1} - F_{y2})$$

$$\sin \delta \cdot \frac{B_f}{2} - (F_{y3} + F_{y4}) \cdot l_r \quad (2)$$

根据假设, 汽车左右两侧动力学对称, 因此左右两侧轮胎力相等, 为简化计算, 采用式(3)所示的轮胎近似线性模型:

$$\begin{cases} F_{y1} = F_{y2} = -k_f \alpha_f \\ F_{y3} = F_{y4} = -k_r \alpha_r \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2006-09-30; 修订日期: 2007-12-24

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划项目(2007E206)

作者简介: 赵伟(1974-), 男, 青海西宁人, 长安大学博士研究生, 河南科技大学讲师, 主要从事汽车系统动力学控制研究, E-mail: zhaoweigao@163.com.

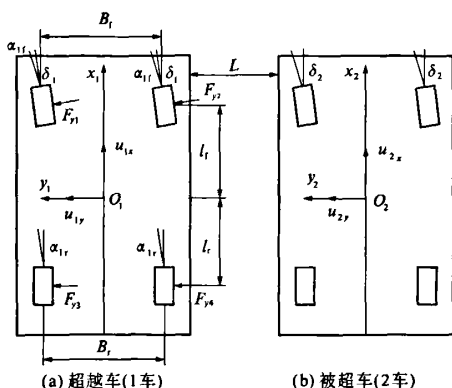


图1 汽车动力学模型

Fig.1 Vehicle dynamic model

前后轮胎侧偏角为

$$\begin{cases} \alpha_f = (u_y + l_f \cdot \omega_r) / u_x - \delta \\ \alpha_r = (u_y - l_r \cdot \omega_r) / u_x \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1)、(2)中,仅考虑小转角的情况,则  $\sin \delta \approx \delta$ ,  $\cos \delta \approx 1$ ,因此上式可简化为

$$m \dot{u}_y = \frac{K_f + K_r}{u_x^2} u_y + \frac{K_f l_f - K_r l_r - m u_x^2}{u_x^2} \omega_r - \frac{k_f \delta}{u_x} \quad (5)$$

$$I_z \dot{\omega}_r = \frac{K_f l_f - K_r l_r}{u_x} u_y + \frac{K_f l_f^2 + K_r l_r^2}{u_x} \omega_r - k_f \delta l_f \quad (6)$$

根据式(5)、(6)整理得到状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_y / u_x \\ \omega_r \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{u} = [\delta]$ ,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{K_f + K_r}{m u_x} & \frac{K_f l_f - K_r l_r - m u_x^2}{m u_x^2} \\ \frac{K_f l_f - K_r l_r}{I_z} & \frac{K_f l_f^2 + K_r l_r^2}{I_z u_x} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{k_f}{m u_x} & -\frac{k_f l_f}{I_z} \end{bmatrix}^T, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中: $m$ 为整车质量; $u_x, u_y$ 为汽车沿 $x, y$ 轴速度; $\ddot{u}_y$ 为汽车沿 $y$ 轴加速度; $\omega_r, \dot{\omega}_r$ 为汽车绕 $z$ 轴横摆角速度和横摆角加速度; $l_f, l_r$ 为质心距前、后轴距离; $F_{yi} (i=1 \sim 4)$ 为各轮胎侧偏力; $B_f, B_r$ 为前、后轮距; $I_z$ 为整车绕 $z$ 轴的转动惯量; $k_f, k_r$ 为汽车前后轮胎侧偏刚度; $K_f = 2k_f, K_r = 2k_r$ ;  $\delta$ 为汽车前轮转角; $\beta$ 为汽车质心侧偏角。

在状态方程中, $\mathbf{x}$ 为状态变量; $\mathbf{y}$ 为输出向量; $\mathbf{A}$ 为系统矩阵,是车速的函数; $\mathbf{u}$ 为控制向量; $\mathbf{B}$ 为控制矩阵; $\mathbf{C}$ 为输出矩阵。

## 2 控制策略

汽车在高速行驶过程中进行超车是频繁且相对复杂的操作,超车时保持两车之间的侧向安全距离是防止侧向碰撞事故的有效方法。两车侧向安全距离与车辆的行驶速度有关,车速越高,则侧向距离越大。如车速为45~60 km/h时,车辆之间最小侧向间距为1~1.5 m,在泥泞或冰雪湿滑路面上该间距应相应的增大。对于行驶过程中出现的紧急状况,如一车突然偏离行驶车道或突然进行转向导致两车侧向间距急剧变小,此时驾驶员不能快速地作出反应进行控制,则汽车侧向防撞系统自动启动进行警示并根据需要快速采取控制措施,甚至在危险状况下对车辆进行紧急制动控制<sup>[5-6]</sup>。

汽车侧向防撞控制系统是一个复杂的非线性系统,其实际特性难以用线性模型准确描述。因此在进行防撞控制系统设计时设定控制系统启动条件如下:

$$\begin{cases} L \leq L_{\text{limit}} \\ L_c \geq L_{c\text{limit}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $L$ 为两车侧向距离; $L_c$ 为两车侧向距离变化率; $L_{\text{limit}}, L_{c\text{limit}}$ 为 $L$ 和 $L_c$ 的触发门限值。

根据式(8),当两车侧向距离小于门限值 $L_{\text{limit}}$ 或侧向距离变化率大于门限值 $L_{c\text{limit}}$ ,即两车接近到一定距离或接近速度过快时,控制系统进行侧向防撞控制。当超越车进行防撞控制时,其前轮转角的大小与车速、两车侧向距离和侧向距离变化率有关,车速高,则前轮转角要小,否则易导致横摆角速度过大而引起翻车危险;而两车侧向间距过小且其变化率较大时,则又要求超越车有较大的前轮转角,以进行紧急避让。

若两车侧向间距过小或侧向间距变化率大于规定的门限值,即满足式(9)的条件时,被动车应进行紧急制动以避免转向过大而引起侧翻。

$$\begin{cases} L \leq L_{\text{min}} \\ L_c \geq L_{c\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $L_{\text{min}}$ 为两车侧向距离最小门限值; $L_{c\text{max}}$ 为两车侧向距离变化率最大门限值。

根据式(9),当两车侧向距离小于门限值 $L_{\text{min}}$ 或其变化率大于门限值 $L_{c\text{max}}$ ,表明两车之间存在侧向碰撞的可能性较大,此时超越车进行转向控制已不能满足防撞的要求或容易出现横摆角速度过大的情况,应对超越车进行紧急制动控制并进行部分转向以减小侧翻危险。

在控制系统中,两车侧向间距目标值设定为  $L_0 = 1.5\text{ m}$ ,

3 模糊控制器设计

模糊控制不依赖于对象模型,能依据系统的动态信息和模糊控制规则进行推理以获得合适的控制量,具有较强的鲁棒性<sup>[7]</sup>. 模糊控制系统将有经验的驾驶员在超车时对汽车所进行的控制经验加以总结并表示成语言控制规则,然后利用这些规则对汽车进行控制,其控制精度和控制速度要优于驾驶员控制的结果.

在控制过程中,单纯采用两车侧向间距  $L$  或侧向间距变化率  $L_c$  为指标对汽车进行控制,汽车易出现响应较慢或不能达到预期控制效果,使得超越车不能快速响应被超车的侧向移动,从而容易出现侧向碰撞事故. 根据研究需要,在模糊控制器的设计中,以两车侧向间距及其变化率作为模糊控制器的输入,即系统的控制参数实际值  $L$  和预期值  $L_0$  的差值  $e = L - L_0$  及其变化率  $ec$  作为控制器输入. 控制器的输出为前轮转角  $\delta$ .

系统控制流程如图 2 所示,图中控制系统触发器的作用是根据  $L$  及  $L_c$  的变化判断汽车是否需要进行避撞控制或制动控制.

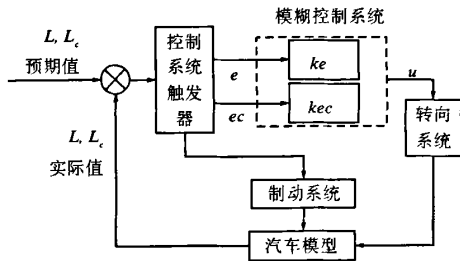


图 2 系统控制流程图

Fig. 2 System control program

在模糊控制系统中,  $E$  为量化后的两车侧向距离,  $EC$  为量化后的两车侧向距离变化率,  $U$  为量化后的前轮转角(或方向盘转角). 输入量模糊化后的论域值分别为  $[0.2, 3]$ ,  $[-1, 1]$ , 输出量模糊化后的论域值为  $[-5, 5]$ , 所采用的模糊输入语言变量子集分别为:  $\{ZE, PS, PM, PB\}$ ,  $\{NM, NS, ZE, PS, PM\}$ ; 输出语言变量的模糊子集为:  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ , 其中:  $NB$ (负大)、 $NM$ (负中)、 $NS$ (负小)、 $ZE$ (零)、 $PS$ (正小)、 $PM$ (正中)、 $PB$ (正大).

隶属函数如图 3 所示,图 3(a)为两车侧向距离输入变量隶属函数,采用三角形隶属函数,由于

两车侧向间距较小时需对汽车进行较复杂的控制,因此隶属函数当侧向间距大于  $2\text{ m}$  时全部采用  $PB$  控制;图 3(b)为两车侧向距离变化率输入变量隶属函数,采用高斯型隶属函数;图 3(c)为超越车前轮转角输出变量  $U$  的隶属函数,其隶属函数也为高斯型. 控制规则共有 20 条,如表 1 所示,各条规则的权重均为 1.

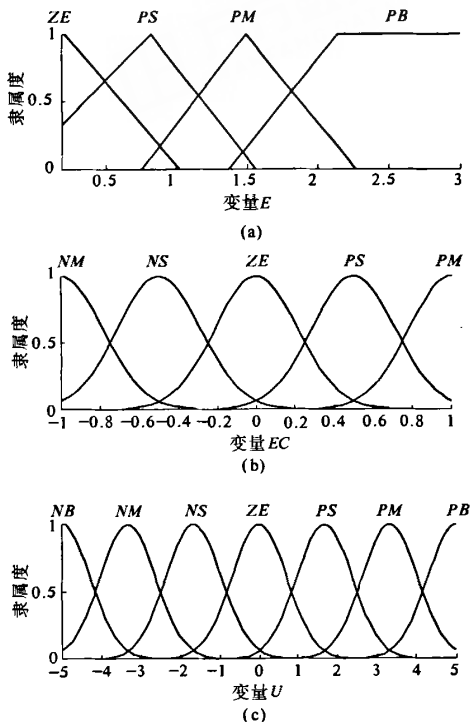


图 3 隶属函数图形

Fig. 3 Member function

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules

U	EC				
	PB	NM	NS	ZE	PM
E	ZE	NB	NB	NB	NB
	PS	NS	NM	ZE	NB
	PM	NM	NM	ZE	PS
	PB	PB	PB	ZE	PB

4 系统仿真

4.1 变车道输入工况

进行变车道输入工况仿真试验时,汽车车速为  $15\text{ m/s}$ ,且两车车速相同. 试验时被超车进行变车道行驶,在汽车直线行驶  $0.5\text{ s}$  时从前轮施加一脉冲转向输入,设定前轮转角最大值为  $5^\circ$ .

而超越车根据两车侧向距离及其变化率进行主动避撞控制,得到两车各项控制参数如图4所示。

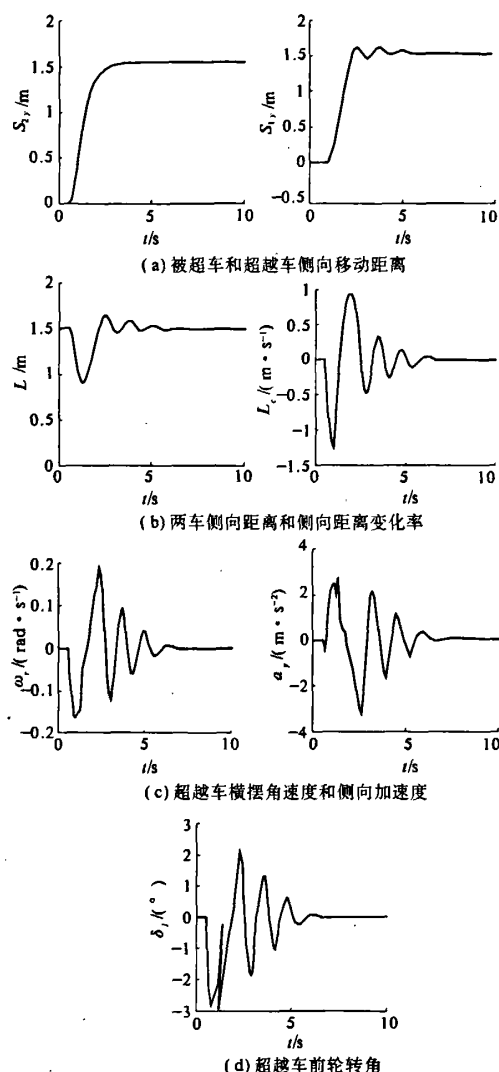


图4 变车道输入工况仿真结果

Fig.4 Results of simulation

两车侧向距离预期值设定为  $L_0 = 1.5$  m. 由图4(a)中看到,当被超车进行变车道转向时,其车道偏移距离为 1.52 m,因此两车侧向间距急剧减小,超越车进行转向控制以增大两车之间的侧向距离.超越车经过控制系统的不断调节控制,侧向偏移距离经过短暂振荡后,稳定在 1.5 m 左右.历时大约 5 s,在控制过程中两车之间的侧向距离最小为 0.85 m.

由图4(b)~(c)中看出,两车侧向距离经过模糊控制器的调整之后趋于稳定,而其侧向加速度和横摆角速度经过不断的变化之后稳定在 0 值

附近,且最大值不超过规定的门限值,从而避免了汽车发生侧翻或激转等危险,表明所设计的模糊控制器是有效的.由于车速较低,各轮胎的侧偏特性变化基本上在线性范围之内.超越车在进行控制时前轮转角最大值为  $3^\circ$ .

#### 4.2 前轮转角正弦输入工况

进行前轮转角正弦输入仿真试验时,车速为 15 m/s,被超车前轮最大转角为  $2^\circ$ ,超越车根据两车侧向距离及其变化率进行避撞控制,得到两车各项控制参数如图5所示。

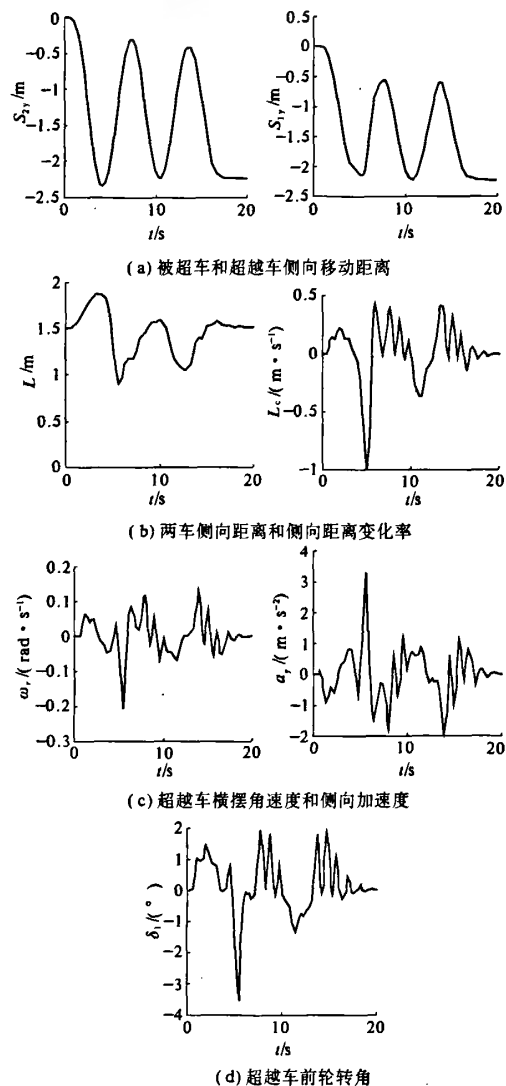


图5 前轮转角正弦输入工况仿真结果

Fig.5 Results of simulation

当侧向避撞控制系统启动后,初始时两车之间侧向距离急剧变化,随着模糊控制系统的控制,超越车不断调整前轮转角的大小和方向,使两车

之间的侧向距离不断接近目标值,并最终稳定在1.5 m附近,超越车在跟踪过程中两车之间侧向距离在0.9~1.8 m附近变化,表明超越车在侧向能很好的跟踪被超车.而图5(c)中超越车横摆角速度和侧向加速度的大小也能保证其不发生侧翻或激转.由于两车车速较低,且被超车的前轮转向幅度较小,因此超越车无需进行制动控制,只采用转向控制即可避免侧撞危险.

## 5 结论

汽车在高速行驶过程中进行超车时,两车并行是一种危险工况,作者根据驾驶员对汽车在并行工况下的控制经验和控制方法,利用模糊控制具有的鲁棒性和不依赖于对象模型的特性,建立了模糊控制系统,给出了汽车在高速并行工况下避免两车侧向碰撞的一种控制方法,提出了侧向避撞控制系统的控制策略和控制模式,选择了实际中常见的变车道控制和蛇形行驶工况进行了仿真试验,通过仿真试验验证了该控制模式能有效地避免汽车在超车时由于两车侧向间距的变化而引起的交通事故,所提出的基于主动转向技术的模糊控制策略能较好的满足汽车超车时的安全性要求,表明所提出的控制策略和控制算法对于提高汽车的行驶安全性是有效的.

## 参考文献:

- [1] LIAW D, CHIANG H, LEE T. A bifurcation study of vehicle's steering dynamics[J]. IEEE, 2005, 35(4): 388-393.
- [2] 徐延海. 基于主动转向技术的汽车防侧翻控制的研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(5): 518-521.
- [3] EDWARD J BEDNER, J, HSIEN H C. A Supervisory Control to Manage Brakes and Four-wheel-steer Systems[C]//SAE Paper. 2004, (1): 1036-1059.
- [4] BOADA B L, BOADA M J L, DIAZ V. Yaw moment control for vehicle stability in a crosswind[J]. Vehicle Design, 2005, 39(4): 75-92.
- [5] ANSGAR T. Integrated vehicle dynamics control using active brake steering and suspension systems[J]. International Journal of Vehicle Design, 2004, 36(1): 1-12.
- [6] YOU S S, CHOI H S, KIM H S, et al. Active steering for intelligent vehicles using advanced control synthesis[J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 42(3-4): 244-262.
- [7] FARZAD T, SHAHROKH F, REZA K M. A fuzzy logic direct yaw moment control system for all wheel drive electric vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(3): 203-221.

## Research of Control Strategy on Avoiding Automobile Side Collision Under Parallel Overtaking Condition

ZHAO Wei<sup>1,2</sup>, WEI Lang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. The College of Vehicle & Motive Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Automobiles are easy to be in danger under parallel overtaking condition when being driven in high speed. Based on the change of side distance between automobiles at the overtaking, a method of controlling parallel driving automobiles by active steering technology is proposed. The method aims to satisfy the safety demand of side distance, to avoid the traffic accident caused by the change of side distance and to reduce the probability of side collision at overtaking. According to the control aim and the control strategy, the fuzzy control model based on the distance between automobiles and its change rate and the fuzzy controller is constructed, and at the same time, the simulation experiment under complex driving condition is carried out. The results show that active steering technology can reduce the probability of collision at overtaking and ensure better safety in high speed driving.

**Key words:** vehicle; fuzzy control; active steering; lateral collision avoidance