

# 基于横摆率跟踪的4WS车辆闭环操纵稳定性\*

羊玢<sup>1†</sup> 孙庆鸿<sup>2</sup> 陈宁<sup>1</sup> 田杰<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037)(2. 东南大学机械工程学院, 南京 210096)

**摘要** 从车辆操纵稳定性多状态量的响应等方面着手,提出了4WS车辆横摆率跟踪多状态最优控制方案,建立了考虑四轮转向车辆动态响应的闭环操纵稳定性仿真模型,比较了采用横摆角速度多状态最优控制方法与前后轮转向比是车速函数的四轮转向控制方法的操纵稳定特性.结果表明对于使用横摆角速度多状态最优控制的4WS车辆,其转向过程中的侧向加速度和横摆角速度等操纵稳定性瞬态特性均明显优于其它4WS控制方法的车辆,同时保持操纵稳定性的稳态特性不变.

**关键词** 4WS车辆, 操纵稳定性, 横摆率跟踪, 闭环系统, 多状态最优控制

DOI: 10.6052/1672-6553-2014-001

## 引言

随着汽车技术的不断发展,人们对汽车主动安全性的要求也越来越高,特别是汽车的操纵稳定性,成为汽车研究的一个重要方面<sup>[1]</sup>.在4WS汽车的研究中,大量的关于后轮参与转向带来的车辆响应变化以及采用各种转向控制策略而产生的差异,近期的研究主要集中于利用现代控制理论方法,如模型参考控制、H $\infty$ /H2多目标优化控制等方面<sup>[2-4]</sup>.

在上述研究中,人们主要是从控制器设计的角度研究4WS车辆的.研究基于的是刚体多自由度系统模型,基本不考虑车辆转向系统的机构动力学特征.

本文采用横摆率跟踪多状态最优控制方法,推导出它的横摆角速度及质心侧偏角与前轮转角的传递函数,建立了一个整车动力学闭环操纵稳定性模型,比较了采用横摆角速度多状态最优控制方法与前后轮转向比是车速函数的四轮转向控制方法的操纵稳定特性.

## 1 4WS汽车的动力学模型

当车辆的侧倾对侧向运动的影响较小时,可采用包含车辆质心侧滑角和横摆角速度的2自由度

运动模型<sup>[5]</sup>来研究车辆的操纵稳定性,4WS汽车的运动方程可表述为

$$mv(\beta + \gamma) = F_f \cos \delta_f + F_r \cos \delta_r \quad (1)$$

$$I_z \dot{\gamma} = l_f F_f \cos \delta_f - l_r F_r \cos \delta_r \quad (2)$$

式中  $m$  为整车质量;  $I_z$  为车辆绕  $Z$  轴的转动惯量;  $l_f, l_r$  分别为前后轴至质心的距离;  $v$  为车辆行驶速度;  $\beta$  为车辆质心侧滑角;  $\gamma$  为车辆横摆角速度;  $\delta_f, \delta_r$  分别为前后轮的转向角;  $F_f, F_r$  分别为前后轮胎的侧滑力.

本文采用 Smithers 非线性稳态轮胎模型,轮胎的其它所有力和力矩由 Fiala 解析模型算出,这种轮胎模型的计算精度较高.前后轮胎的侧偏角  $\partial_f, \partial_r$  可分别表示为

$$\partial_f = \delta_f - \beta - (l_f/v)\gamma \quad (3)$$

$$\partial_r = \delta_r - \beta - (l_r/v)\gamma \quad (4)$$

轮胎侧偏角小于  $5^\circ$  时,根据轮胎的稳态侧偏特性,轮胎侧偏角和侧向力基本成线性关系,则前后轮的侧偏刚度  $C_f$  和  $C_r$  为定值,前后轮上的侧偏力可分别近似为

$$F_f = 2C_f \partial_f \quad (5)$$

$$F_r = 2C_r \partial_r \quad (6)$$

由式(1)~式(6)得到4WS汽车的动力学模型<sup>[6]</sup>为

$$mv(\beta + \gamma) = -2(C_f + C_r)\beta -$$

2013-01-30 收到第1稿,2013-12-12 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(11272159)

† 通讯作者 E-mail: yangb123@126.com

$$[2(l_f C_f - l_r C_r)/v] \gamma + 2C_f \delta_f + 2C_r \delta_r \quad (7)$$

$$I_z \dot{\gamma} = -2(l_f C_f - l_r C_r) \beta - [2(l_f^2 C_f - l_r^2 C_r)/v] \gamma + 2l_f C_f \delta_f - 2l_r C_r \delta_r \quad (8)$$

取状态变量  $\mathbf{x} = [\beta \quad \gamma]^T$ , 将上述微分方程转化为状态方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta_f + \mathbf{E}\delta_r \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2(C_f + C_r)/(mv) & -2(l_f C_f - l_r C_r)/(mv^2) - 1 \\ -2(l_f C_f - l_r C_r)/I_z & -2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)/(I_z v) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2C_f/(mv) \\ 2l_f C_f/I_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2C_r/(mv) \\ -2l_r C_r/I_z \end{bmatrix}$$

## 2 横摆率跟踪多状态最优控制

车辆操纵稳定性必须考虑多状态量的响应, 这些状态量主要由车辆质心横摆率、侧偏角和侧向加速度组成. 考虑到以上各种因素及实际研究目标, 本文采用了横摆率跟踪多状态最优控制方法, 通过同时考虑比例于前轮转角和横摆角速度控制的方法, 使得控制器的数量由两个降为一个, 同时控制横摆角速度和质心侧偏角两个性能指标, 使其得到优化. 该控制方法具有结构和算法简单, 要求测量的状态量少等优点, 控制框图如图 1 所示.

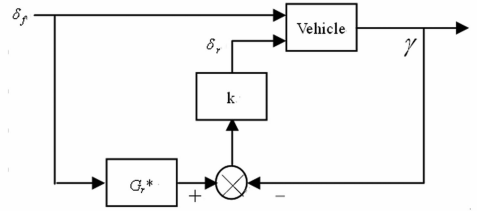


图 1 横摆率跟踪多状态最优控制算法

Fig. 1 The multi-variable stabilization control algorithm

其控制算法的表达式为

$$\delta_r = -k(\delta_f G_r^* - \gamma) \quad (10)$$

## 3 4WS 车辆闭环操纵稳定性

### 3.1 转向盘转角阶跃输入试验仿真

该试验方法是在一定的输入下给转向盘一个突然的转角, 并固定不变, 这相当于给系统一个阶跃位移干扰, 本文采用车速  $60 \text{ km/h}$ , 前轮转角  $120^\circ$ , 后轮为取不同  $k$  值时的转角.

图 2 和图 3 是阶跃时间为  $1 \text{ s}$  时横摆角速度与后轮转角仿真曲线, 不同的操纵稳定性评价指标如表 1 所示.

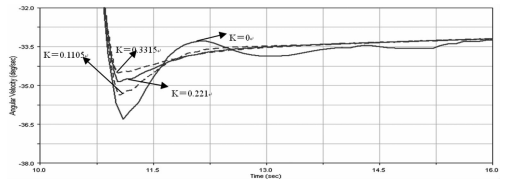


图 2 质心横摆角速度曲线

Fig. 2 The yaw angular velocity curve

表 1 不同的评价指标 ( $v = 60 \text{ km/h}, \delta = 12^\circ$ )

Table 1 Different evaluation index ( $v = 60 \text{ km/h}, \delta = 12^\circ$ )

Control algorithm of k value	Yaw rate peak (deg/s)	Yaw rate stable value (deg/s)	Stable time (s)	Peak lateral acceleration ( $\text{m/s}^2$ )	Lateral acceleration stable value ( $\text{m/s}^2$ )	Yaw rate overshoot	Rear wheel angle maximum (deg)
0	36.2968	33.75	1.3454	10.2	/	7.5%	0
0.1105	35.3631	33.5	1.2198	9.683	9.577	5.56%	0.251
0.2210	34.8577	33.5	0.8519	9.630	9.577	4.05%	0.3949
0.3315	34.5123	33.5	0.8571	9.605	9.577	3.02%	0.503

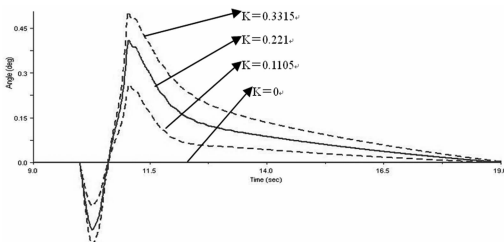


图 3 后轮转角曲线

Fig. 3 The rear wheel angle curve

从图 2、图 3 和表 1 可以得到:

① 在加上后轮转向控制后, 横摆角速度的稳定值基本一致, 说明该种控制方法仅对横摆角速度瞬态响应有影响, 而对其稳态值并不明显改变.

② 在加了转向控制的情况下, 转向时的稳定时间明显缩短, 横摆角速度的峰值明显降低, 并且随着控制算法中  $k$  值的增大, 峰值越来越低, 在横摆角速度稳定值相同的情况下, 横摆角速度的超调量也迅速降低. 当  $k = 0.3315$  时, 横摆角速度的超调量只达到 2WS 时的 40.3%.

表2 整车质量不同时各项指标评价

Table 2 Different evaluation index under different vehicle quality

Front wheel angle(°)	Control algorithm of k value	Vehicle quality(kg)	Yaw rate peak(deg/s)	Yaw rate stable value(deg/s)	Response time(s)	Stable time(s)	Yaw rate overshoot
12	0.2210	1000	34.8577	33.5	0.925	0.8519	4.05%
12	0.2210	1300	32.1089	30.2479	0.87	1.25	6.15%
12	0.2210	1500	30.4732	28.6385	0.86	1.31	6.40%

表3 比例于前轮转角的评价指标

Table 3 Different evaluation index based on proportional angle

Control algorithm	Yaw rate peak(deg/s)	Yaw rate stable value(deg/s)	Stable time(s)	Peak lateral acceleration(m/s <sup>2</sup> )	Lateral acceleration stable value(m/s <sup>2</sup> )	Yaw rate overshoot	Rear wheel angle maximum(deg)
$\delta_r = 0$	36.2968	33.75	1.3454	10.2	/	7.5%	0
$\delta_r = \delta_f/24$	35.2029	33.6449	0.9459	10.108	/	4.43%	0.5
$\delta_r = \delta_f/12$	34.2293	33.3777	0.885	10.005	/	2.49%	1
$\delta_r = -k(\delta_f G_r^* - \gamma)$	34.5123	33.75	0.8571	9.605	9.577	2.26%	0.503

由此可以说明:在不同的车速及前轮转角的情况下,横摆率跟踪多状态最优控制方法均能对车辆的瞬态操纵稳定性起到明显的改善作用,同时保持车辆的稳态操纵稳定性不变。

### 3.2 整车质量对转向特性的影响

为了研究采用横摆率跟踪多状态最优控制策略的四轮转向车辆转向特性与整车质量的关系,下面对车速为60 km/h的车辆阶跃响应进行仿真,设定仿真时的整车质量为1000kg、1300kg和1500kg。其横摆角速度仿真曲线及相关数据如图4和表2所示:

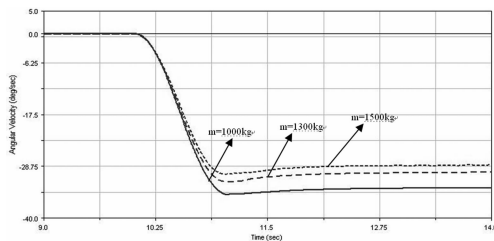


图4 不同质量下横摆角速度曲线

Fig. 4 Yaw rate curve under different vehicle quality

通过对比分析,可得出以下结论:四轮转向车辆随整车质量的增加,横摆角速度的稳态值降低,超调量加大,稳定时间延长,而反应时间略有缩短,这与相关文献中提出的前轮转向车辆的阶跃响应特性有同样的趋势<sup>[7]</sup>。

由以上分析可以看出,采用横摆率跟踪多状态最优控制策略的四轮转向车辆,整车质量的变化对横摆角速度的稳态值影响较大。

### 3.3 前后轮转向比是车速函数控制方法

下面将采用前后轮转向比是车速函数的后轮转向控制方法,并与横摆角速度多状态最优控制策

略的4WS车辆操纵稳定性特性进行比较。用前后轮转向比是车速函数的方法定义行驶速度为60 km/h时的前后轮转角比例,进行的4WS闭环车辆操纵稳定性仿真,结果如表3所示。

从表3可以得到:

① 使用横摆角速度多状态最优控制的方法,横摆角速度的稳定值与2WS车辆基本一致,说明该种控制方法对其稳态响应没有影响。而使用比例于前轮转角的后轮转向控制方法,随着比例系数的提高,横摆角速度稳定值逐渐降低。

② 采用两种控制算法均能使稳定时间缩短,但是在采用横摆角速度最优控制方法的情况下,稳定时间最短。

③ 在加了横摆角速度多状态最优控制的情况下,横摆角速度的峰值明显降低,其横摆角速度的超调量只有2.26%。在采用比例于前轮转角的后轮转向控制方法时,横摆角速度的峰值及超调量也会随着比例系数的提高而逐渐降低,但降低的幅度没有前一种控制方法大。

④ 在前后轮转角比例控制的情况下,车辆质心的侧向加速度和对后轮未进行转向控制时一样存在波动,而并不是收敛于一个稳定值。而在加上了横摆角速度多状态最优控制之后,侧向加速度值迅速收敛,车辆明显呈现不足转向的趋势,提高了车辆转向过程中的稳定系数。

## 4 结论

(1) 本文建立了闭环控制主动4WS车辆动力学模型和采用了横摆率跟踪多状态最优控制方法,

通过同时考虑比例于前轮转角和横摆角速度控制的方法,同时控制横摆角速度和质心侧偏角两个性能指标,使其得到优化。

(2) 使用横摆角速度多状态最优控制的方法,对车辆操纵稳定性的改善要明显优于前后轮转向比是车速函数的后轮转向控制方法,同时又无须增加控制器的数量。

## 参 考 文 献

- 1 高举成, 张兆合, 杨昌明. 汽车操纵稳定性稳态响应参数的单位与量纲. 动力学与控制学报, 2011, 9(2): 167 ~ 171 (Gao J C, Zhang Z H, Yang C M. Unit and dimension of steady-state response parameter about vehicle handling stability. *Journal of Dynamics and Control*, 2011, 9(2): 167 ~ 171 (in Chinese))
- 2 Lukowski S, Momot M, Kraemer D, et al. Basic linear theory of handling and stability of automobiles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2009, 223(1): 1 ~ 10
- 3 Koumboulis F N and Skarpetis M G. Robust control of cars with front and rear wheel steering. *IEEE Processing Control Theory Application*, 2002, 149(5): 394 ~ 404

- 4 殷国栋, 陈南, 李普. 基于降阶观测器的四轮转向车辆随动操纵瞬态稳定性分析. 中国机械工程, 2004, 15(14): 1298 ~ 1231 (Yin G D, Cheng N, Li P. Transient follow handling stability analysis for four-wheel steering vehicle based on reduced order observer. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 15(14): 1298 ~ 1231 (in Chinese))
- 5 姜春生, 李韶华, 路永婕. 基于 ADAMS 重型汽车操纵稳定性仿真研究. 动力学与控制学报, 2011, 9(3): 268 ~ 270 (Jiang C S, Li S H, Lu Y J. Simulation research on manipulation stability of heavy vehicle based on ADAMS. *Journal of Dynamics and Control*, 2011, 9(3): 268 ~ 270 (in Chinese))
- 6 吕红明, 陈南, 李普. 横摆率跟踪控制的 4WS 汽车闭环操纵稳定性. 汽车工程, 2005, 27(3): 337 ~ 339, 376 (LV H M, Chen N, Li p. Closed-loop handling and stability of four-wheel steering vehicle with yaw-rate tracking control. *Automotive Engineering*, 2005, 27(3): 337 ~ 339, 376 (in Chinese))
- 7 徐瑾, 赵又群, 阮米庆. 基于汽车操纵动力学的神经网络驾驶员模型. 动力学与控制学报, 2008, 6(4): 381 ~ 384 (Xu J, Zhao Y Q, Ruan M Q. The artificial neural network driver model based on vehicle handling dynamics. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(4): 381 ~ 384 (in Chinese))

# CLOSED-LOOP HANDLING STABILITY OF 4WS VEHICLE BASED ON YAW-RATE TRACKING \*

Yang Bin<sup>1†</sup> Sun Qinghong<sup>2</sup> Chen Ning<sup>1</sup> Tian Jie<sup>1</sup>

(1. College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(2. School of Mechanical Engineering of Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Vehicle handling stability response from multiple state variables was considered. A multi-variable stabilization control algorithm for four-wheel steering vehicle based on yaw-rate tracking was put forward. To improve the vehicle dynamic response in a high speed range, the closed-loop simulation model of 4WS system was established. The transient and steady maneuverability of the 4WS vehicle was tested by using the visual prototyping model with the different control algorithms. The results show that the nonzero input of the rear steering angle is suitably controlled according to the 4WS multi-variable stabilization control algorithm, the transient responses of 4WS vehicle will be significantly improved, such as the lateral acceleration and its yaw angular velocity, meanwhile, its steady maneuverability is unchangeable.

**Key words** 4WS (four-wheel-steering) vehicle, handling stability, yaw-rate tracking, closed-loop system, multi-variable stabilization control

Received 30 January 2013, revised 12 December 2013.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(11272159)

† Corresponding author E-mail: yangb123@126.com