

文章编号:1671-6833(2007)03-0112-05

模型跟踪四轮主动转向汽车的 H_∞ 控制

杜峰¹, 魏朗¹, 李泽民²

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 郑州大学 管理工程系, 河南 郑州 450001)

摘要: 将 H_∞ 优化控制理论应用于四轮主动转向汽车控制策略研究, 在建立车辆转向理想跟踪模型的基础上, 提出一种基于 H_∞ 模型跟踪技术的四轮转向 4WS 汽车前后轮转角主动控制新方法, 并对所设计的控制器进行仿真分析与对比。通过仿真分析, 从理论上验证了基于 H_∞ 跟踪控制理论所设计的控制器可以适用于汽车的四轮转向系统, 能很好地跟随理想车辆转向模型, 有利于提高车辆的主动安全。

关键词: 四轮转向; H_∞ 跟踪控制; 仿真分析; 操纵稳定性

中图分类号: U 461.6 **文献标识码:** A

0 引言

四轮转向(4WS)技术是汽车主动底盘技术的重要组成部分, 4WS 汽车通过后轮直接参与对汽车侧向运动和横摆运动的控制, 不仅可减小转向力产生的滞后, 且能独立地控制汽车的运动轨迹和姿态, 有效改善汽车低速转向时的机动灵活性和高速转向时的操纵稳定性^[1]。4WS 车辆操纵控制一般有 2 种方案: 一种是前轮转角由驾驶员通过转向盘及转向传动机构控制, 后轮转角则由控制器控制, 使车辆横摆角速度跟随一个理想车辆模型; 另一种方案是将驾驶员的转向操作与转向车轮之间通过信号及控制器连接起来, 控制器根据驾驶员指令, 跟随一个理想车辆参考模型, 确定合理的前后轮转角, 实现转向的智能控制, 即所谓的线控转向(steering-by-wire)^[2]。笔者针对后一种四轮转向方案, 确立理想车辆跟踪模型, 进行 H_∞ 鲁棒控制研究和控制器设计, 并对所设计的控制器进行仿真分析与对比, 从理论上验证该控制策略的可行性。

1 汽车侧向动力学模型

1.1 4WS 汽车侧向动力学模型

4WS 汽车的研究大部分使用包含横摆角速度和质心侧偏角的线性 2 自由度“自行车”模型。理论和实验都证明^[3], 在正常车速的非紧急状态和小转向角情况下, 模型能以较好的精度表征车

辆转向的实际物理过程, 基于它们设计的控制器能够正常工作。

建模时做如下假设: 忽略转向系统的影响, 直接以前轮转角作为输入; 认为转向时汽车行驶速度大小保持不变; 忽略汽车的侧倾与俯仰运动, 认为汽车只作平行于地面的平面运动, 则汽车只有沿 Y 轴的侧向运动与绕 Z 轴的横摆运动 2 个自由度。建立汽车动力学微分方程如下:

$$\begin{cases} m u (\dot{\beta} + r) = (k_f + k_r) \beta + \frac{1}{u} (a k_f - b k_r) r - k_f \delta_f - k_r \delta_r \\ I_z \dot{r} = (a k_f - b k_r) \beta + \frac{1}{u} (a^2 k_f + b^2 k_r) - a k_f \delta_f + b k_r \delta_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: β 为质心侧偏角; r 为横摆角速度; u 为汽车质心纵向速度; m 为汽车质量; k_f, k_r 为前、后轮等效侧偏刚度; a, b 为质心至前、后轴的距离; δ_f, δ_r 为前、后轮转角; I_z 为汽车绕质心的转动惯量。

将(1)式化为状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix};$$

$$a_{11} = \frac{k_f + k_r}{mu}; \quad a_{12} = \frac{a k_f - b k_r}{mu^2} - 1;$$

$$a_{21} = \frac{a k_f - b k_r}{I_z}; \quad a_{22} = \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z u};$$

收稿日期: 2006-05-10; 修订日期: 2007-05-31

作者简介: 杜峰(1970-), 男, 河南西峡人, 长安大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事车辆动力学及控制方面的研究工作。

$$b_{11} = \frac{-k_f}{mu}; b_{12} = \frac{-k_r}{mu}; b_{21} = \frac{bk_f}{I_z}; b_{22} = \frac{-ak_f}{I_z};$$

对(1)或(2)式进行拉普拉斯变换,可得4WS汽车前后轮转角 $\delta f, \delta r$ 至汽车质心侧偏角 β 与横摆角速度 r 的传递函数阵 G_0 ,即

$$\begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} = G_0 \begin{bmatrix} \delta f \\ \delta r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{\beta-\delta f} & G_{\beta-\delta r} \\ G_{r-\delta f} & G_{r-\delta r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f \\ \delta r \end{bmatrix} \quad (3)$$

G_0 中各项表达式限于篇幅,不具体表述。

1.2 理想车辆转向模型

传统的4WS汽车,当附加了后轮转角之后,车辆本身的横摆角速度稳态增益(转向灵敏度)和侧向加速度稳态增益将随车速和前轮转角发生较大变化(前后轮转向角同相时,二者稳态增益减小;前后轮转向角反相时,二者稳态增益增大),这增加了驾驶的难度,在高速时也增加了驾驶员的疲劳程度^[4],目前四轮转向的研究集中在车辆转弯时的状态变量能够跟随理想模型参考变量,以达到车辆转向的理想状态。为保证4WS汽车转向时横摆角速度稳态增益与传统的前轮转向车辆(FWS)相同,也就是要保持驾驶员的驾驶感觉不发生较大的变化,同时满足质心侧偏角尽量为零以保持转向时良好车身姿态,构造车辆(FWS)理想模型为:

$$\begin{bmatrix} \beta_d \\ r_d \end{bmatrix} = W_d \cdot \delta_f^* = \begin{bmatrix} W_{\beta d} \\ W_{rd} \end{bmatrix} \cdot \delta_f^* = \begin{bmatrix} 0 \\ W_{rd} \end{bmatrix} \cdot \delta_f^* \quad (4)$$

式中: W_d 为传递函数阵; $W_{\beta d}, W_{rd}$ 为前轮转角; δ_f^* 为理想车辆模型质心侧偏角 β_d 与横摆角速度 r_d 的传递函数。 $W_{\beta d} = 0$ 意味着对任意前轮转角输入,车辆均无侧滑;而为了保证横摆角速度瞬态响应能以一价惯性传函特性迅速达到稳态值, W_{rd} 规定如下^[5]:

$$W_{rd} = \frac{k_{rd}}{1 + \tau_{rd} \cdot s}; k_{rd} = \frac{u}{(1 + k \cdot u^2) \cdot (a + b)};$$

$$k = \frac{m}{(a + b)^2} \cdot \left(\frac{a}{k_f} - \frac{b}{k_r} \right); k_0 = \frac{b_{11}a_{22} - b_{21}a_{12}}{a_{12}b_{22} - a_{22}b_{12}};$$

$$\tau_{rd} = \frac{k_0(b_{12}a_{21} - b_{21}a_{11}) + (b_{11}a_{21} - b_{21}a_{11})}{(k_0b_{22} + b_{21})(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}.$$

式中: k_{rd} 取为理想 FWS 车辆横摆角速度稳态增益, k 为车辆稳定性因数; τ_{rd} 为一价惯性环节时间常数。

2 模型跟踪四轮主动转向汽车 H_∞ 控制^[6]

2.1 H_∞ 标准控制问题

近年日益发展成熟的 H_∞ 控制理论,不但可

对控制系统进行优化设计,控制精度高,还可满足鲁棒性要求。 H_∞ 优化控制是通过对所研究对象的某些闭环性能指标的 H_∞ 范数优化而获得最优控制器的一种控制理论;即通过抑制传递函数幅频特性的最大幅值来减小输入信号对描述系统品质的评价信号的影响。在控制系统中,许多要求不同的 H_∞ 优化问题可转化为同一模式问题,即 H_∞ 标准问题进行求解,其描述如图1所示。

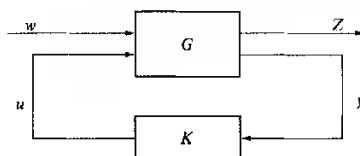


图1 标准 H_∞ 控制框图

Fig. 1 Block diagram of H_∞ standard problem

H_∞ 最优控制问题就是求一真实的有理控制器 K ,使 G 稳定,且使由输入信号 w 至受控输出 z 的传递函数 T_{zw} 的 H_∞ 范数极小。

2.2 四轮主动转向 H_∞ 跟踪控制器设计

对于(2)式建立的车辆系统动力学方程,采用主动四轮转向的4WS汽车跟踪问题描述见图2。

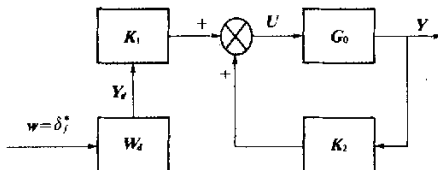


图2 4WS汽车跟踪控制框图

Fig. 2 Block diagram of track control for 4WS vehicle

图中 G_0 为实际受控对象(4WS系统),其输出 Y 要跟踪参考输入信号 Y_d ; W_d 为前述理想车辆模型传递函数。这里直接以汽车前轮转角 δ_f^* 作为驾驶员指令(即外部输入信号 w);控制输入 U 由控制器产生的实际前后轮转角控制量 δf 和 δr 组成; K_1 和 K_2 为待设计的控制器; Y_d 和 Y 分别是理想车辆模型与实际量测的4WS汽车质心侧偏角和横摆角速度构成的二维状态向量。即,

$$U = \begin{bmatrix} \delta f \\ \delta r \end{bmatrix} = K_1 Y_d + K_2 Y = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_d \\ Y \end{bmatrix}$$

$$\text{式中: } Y_d = \begin{bmatrix} \beta_d \\ r_d \end{bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix}.$$

要设计的目标是:选择真实有理的控制器 K_1 和 K_2 ,使跟踪误差 $\|Y_d - Y\|_2^2$ 取极小。

为了保证控制器的物理可实现,需在设计中对目标函数增加控制能量的加权项,因此取 $\|Y_d - Y\|_2^2 + \|\rho U\|_2^2$ 作为目标函数,其中 $\rho > 0$ 为加权因子,其等价于信号 $z = [Y_d - Y \quad \rho U]^T$ 的 H_2 范数极小化问题,即 $\min \|z\|_2$.

将该跟踪问题化为 H_2 标准控制问题,取量测信号为 $y = [Y_d \quad Y]^T$,被控输出为 $z = [Y_d - Y \quad \rho U]^T$,控制信号为 U ,外部输入信号为 $w = \delta_f^*$. 则广义被控对象方程为:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_d - Y \\ \rho U \\ Y_d \\ Y \end{bmatrix} = G \cdot \begin{bmatrix} w \\ U \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_d & -G_0 \\ 0 & \rho I \\ W_d & 0 \\ 0 & G_0 \end{bmatrix}$$

式中: W_d 为式(4)描述的传递函数阵; G_0 为式(3)描述的传递函数阵; I 为 2×2 单位阵.

这样就将图2所示跟踪问题转化成图1所示的 H_2 标准问题,具体如图3所示,其中的 U, Y 为实际4WS车辆系统的输入输出信号.

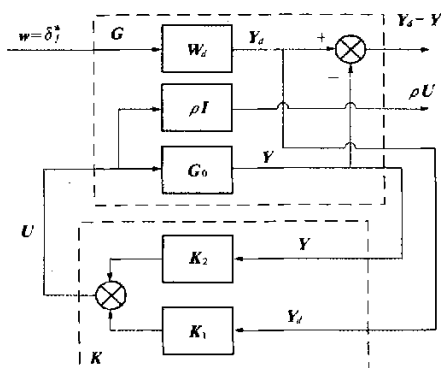


图3 4WS汽车跟踪控制 H_2 标准化框图

Fig.3 Block diagram standardized of H_2 track control for 4WS vehicle

3 仿真对比与分析

为了对比 H_2 控制效果,同时进行了相同结构参数的前轮转向(FWS)汽车与经典的比例控制4WS汽车的转向响应仿真.比例控制指的是转向时4WS汽车后轮转角始终比例于前轮转角,该比值 K_B 是车速 u 的函数.比例控制的优点是可保证汽车在稳态时质心侧偏角恒为零^[7].

万方数据

$$K_B = \frac{\delta r}{\delta f} = \frac{-b - mau^2/[k_f(a+b)]}{a - mbu^2/[k_f(a+b)]} \quad (8)$$

仿真分析利用 Matlab/Simulink 工具箱,采用的车辆参数为^[7]: $m = 2\,996 \text{ kg}$, $a = 1.4 \text{ m}$, $b = 1.45 \text{ m}$, $I_x = 4\,987 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $k_f = -53\,362 \text{ N/rad}$, $k_r = -73\,421 \text{ N/rad}$. 仿真输入指令为前轮 5° 转向角阶跃信号,仿真时间 5 s ,取加权因子 $\rho = 0.01$. 当车速 90 km/h 和 30 km/h 时,计算所得的 H_2 最优性能指标分别为 $0.031\,3$ 和 $0.015\,6$,仿真结果如图4、图5所示.

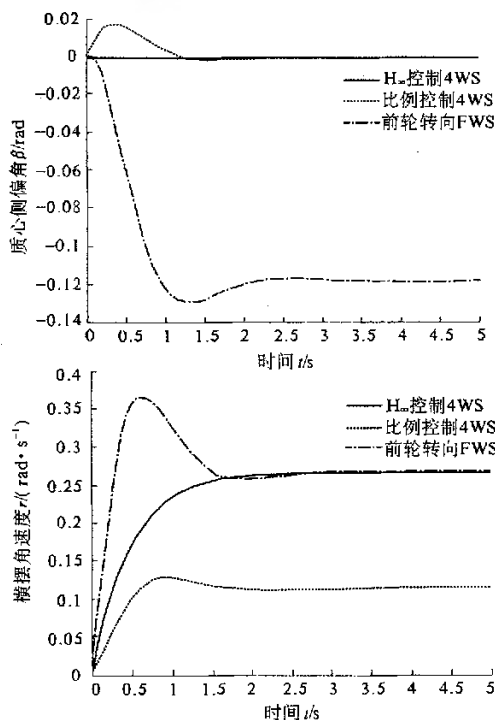


图4 车速 90 km/h 转向响应曲线

Fig.4 Steering response curve at 90 km/h velocity

表1中给出了 90 km/h 车速下对应不同控制方式,汽车质心侧偏角 β 和横摆角速度 r 的阶跃响应性能指标对比.

表1 汽车 90 km/h 阶跃响应性能指标

Tab.1 Performance index with step response at 90 km/h

阶跃响应指标		前轮转向 FWS	比例控制 4WS	H_2 控制 4WS
超调量	$\beta/\%$	9.435 6	—	—
稳态值	β/rad	-0.118 3	0	0
过渡时间	$r/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.266 9	0.113 3	0.266 6
	β/s	1.954 0	—	—
	r/s	2.286 7	1.666 8	1.889 8

从图4和表1中看出,在高速情况下,对于质心侧偏角响应,FWS汽车在经过一定的瞬态振荡后,稳定在 -0.1183 rad ,而比例控制4WS与 H_∞ 控制4WS汽车稳态值均为0,这表明 H_∞ 控制与比例控制均能保证转向时车身姿态良好,防止高速时的车辆侧滑,但比例控制4WS汽车表现有轻微的振荡响应过程。对于横摆角速度响应,相对于FWS汽车,比例控制4WS与 H_∞ 控制4WS汽车过渡时间均有所下降, H_∞ 控制4WS汽车稍长于比例控制4WS汽车,但 H_∞ 控制过渡过程平稳和缓,无振荡超调,而比例控制4WS汽车却有一定的振荡超调量;对于横摆角速度稳态值, H_∞ 控制4WS汽车与FWS汽车相吻合(0.2666 rad/s),而比例控制4WS汽车其稳态值(0.1133 rad/s)相对于FWS汽车下降很大。以上分析表明 H_∞ 控制4WS汽车明显改善传统FWS汽车横摆角速度的瞬态响应过程,精确地跟踪其稳态值,即保持转向灵敏度的一致,又保证了驾驶员的操作强度与驾驶感觉相对于FWS汽车无明显变化,而比例控制4WS汽车在高速时将增加驾驶员操作强度,并加重其心理负担。

从图5中看出,在低速情况下转向时,同高速一样,FWS汽车质心侧偏角在经过一定程度的瞬态振荡后,稳定在 0.0015 rad ,而比例控制与 H_∞ 控制4WS汽车质心侧偏角稳态值均为0,但比例控制4WS汽车同样具有一定的瞬态振荡过程;在低速时3种方式转向的横摆角速度稳态值接近, H_∞ 控制4WS汽车与传统FWS汽车稳态值一致,而比例控制4WS汽车稳态值稍大,这些均表明 H_∞ 控制很好地跟踪了理想车辆转向模型。

4 结束语

通过仿真分析,从理论上验证了基于 H_∞ 跟踪控制技术所设计的控制器可以适用于汽车的四轮转向系统,并能很好地跟随理想车辆转向模型。相对于前轮转向汽车, H_∞ 跟踪控制明显改善4WS车辆转向过程的瞬态响应特性,始终保持转向过程中质心侧偏角为零值,校正了转向时的车身姿态,防止车辆侧滑;此外, H_∞ 跟踪控制还克服了比例控制四轮转向汽车转向灵敏度与前轮转向汽车不一致的缺陷。因此, H_∞ 跟踪控制4WS汽车具有更优的操纵稳定性能,提高了车辆主动安全性。

万方数据

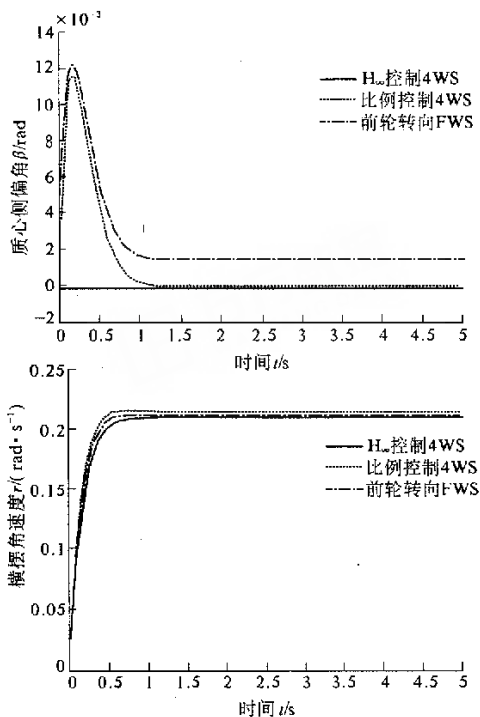


图5 车速30 km/h转向响应曲线

Fig.5 Steering response curve at 30 km/h velocity.

参考文献:

- [1] 屈求真,刘延柱,张建武. 四轮转向汽车自适应模型跟踪控制研究[J]. 汽车工程,2002,22(2):73-76.
- [2] 李普,陈南,孙庆鸿. 4轮转向车辆主动鲁棒抗侧倾操纵研究[J]. 汽车工程,2004,26(5):560-563.
- [3] DIRK E S, JONE M S. Effect of model complexity on the performance of automated vehicle steering controllers: model development, validation and comparison[J]. Vehicle System Dynamics, 1995,24(2):163-181.
- [4] 郭孔辉,轧浩. 四轮转向的控制方法的发展[J]. 中国机械工程,1998,9(5):73-75.
- [5] WILL A B, ZAK S H. Modelling and control of an automated vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 1997,27(3):131-155.
- [6] 于长官. 现代控制理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [7] 舒进,陈思忠. 四轮转向车辆运动计算分析[J]. 湖北汽车工业学院学报,2002,16(3):1-5.
- [8] 岑少超,潘筱,秦东晨. ADAMS在汽车操纵稳定性仿真中的应用研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2006,27(3):55-58.

H_{∞} Control for Active Four-wheel Steering Vehicle Based on Model Track

DU Feng¹, WEI Lang¹, LI Yu-min²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Department of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By using advanced H_{∞} -optimization control theory, this paper presents a new control strategy for four-wheel steering (4WS) vehicle. Based on the H_{∞} model tracking technology, the controller for front and rear wheel active steering is designed. Furthermore, the reference model that was tracked by 4WS vehicle is also studied. Simulation and analysis are performed to verify designed controller in the end. The simulation results draw a theoretical conclusion that the designed controller can be applicable to the 4WS vehicle system. This proposed scheme not only minimizes the side slip angle to zero, but also maintains the yaw rates in accordance with front-steering vehicle. Thus, it is beneficial to the active safety of vehicle.

Key words: four-wheel steering; H_{∞} track control; simulation and analysis; maneuverability and stability

(上接第 111 页)

参考文献:

- [1] 董知军, 刘立平, 王蓉辉, 等. 内蒙古扎赉特旗油砂分离[J]. 石油化工高等学校学报, 2005, 18(4): 31-34.
- [2] 刘殿君, 吉豪杰, 杨燕, 等. 水剂空气化分离油砂的研究[J]. 广州化工, 2006, 34(1): 41-42.
- [3] 周建伟, 李术元. 油砂沥青热水抽提机理和沥青黏度性质研究[A]. 第九届全国化学工艺学术年会[C]. 北京, 2005: 577-582.
- [4] 李生华, 刘晨光, 阙国和, 等. 减压渣油的胶体结构及其形成[J]. 石油大学学报, 1997, 21(6): 71-76.

Study on Viscosity - breaking of Inner Mongolia Oil - sand Bitumen to Produce Fuel Oil

LIU Li-ping¹, SHEN Zhi-bing², CAO Zu-bin^{2*}, ZHU Xiang-qin², QIU Hui-xian³, DU He-bing³

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Department of Petrochemical Technology, Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, Fushun 113001, China; 3. Inner Mongolia Bo-Yuan Engineering Corporation, Ordos 017000, China)

Abstract: Thermal visbreaking of inner Mongolia oil - sand bitumen was conducted at several temperatures for different lengths of time in the laboratory. The viscosity of the thermally treated oil was reduced dramatically with thermal treatment under the condition of adding 0.3% anti-coking agent, the oil - sand kinematic viscosity(100℃) is 138.25 mm² · s⁻¹ and the qualities of it conform to 7# Chinese Standard for Fuel Oil, which can directly be regarded as product.

Key words: oil sand bitumen; visbreaking; viscosity; fuel oil