

文章编号: 1001-0920(2009)01-0153-04

提高车辆安全性的输出反馈自适应控制

陈长芳, 武玉强

(曲阜师范大学 自动化研究所, 山东 曲阜 273165)

摘要: 研究含有时变参数的车辆动力学模型的输出跟踪控制问题. 控制目标是使车辆的横摆角速度和质心侧偏角分别跟踪理想的设定值, 通过反推方法设计输出反馈自适应控制器. 控制器的输出为主动横摆力矩, 通过控制主动横摆力矩来控制车辆的输出响应跟踪理想的输出信号, 从而提高车辆的安全性. 仿真结果表明, 该控制器能更好地适应车速和路况的变化, 鲁棒性强.

关键词: 车辆动力学模型; 输出反馈; 横摆力矩; 非线性自适应控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Output-feedback adaptive control for improving vehicle safety

CHEN Chang-fang, WU Yu-qiang

(Institute of Automation, Qufu Normal University, Qufu 273165, China. Correspondent: WU Yu-qiang, E-mail: wyq@qfnu.edu.cn)

Abstract: The problem of output tracking control of vehicle dynamic model with time-varying parameters is investigated. The control object is to force the yaw rate and the side slip angle track their desired signal. The idea of backstepping is used to design output-feedback adaptive controller. The output of the controller is yaw moment, which is used to make the actual vehicle response track the given reference signal so as to improve vehicle safety. The simulation results show that the controller can adjust to the change of vehicle speed and road condition and has strong robustness.

Key words: Vehicle dynamic model; Output-feedback; Yaw moment; Nonlinear adaptive control

1 引言

主动横摆力矩控制方法是车辆底盘主动控制技术之一, 它能有效防止车辆滑转, 提高车辆的主动安全性, 因而受到许多研究者的关注^[1-4]. 横摆角速度是描述车辆横向运动的基本状态变量, 控制横摆角速度就是使车辆的实际横摆角速度等于理想横摆角速度. 当车辆不稳定时, 质心侧偏角会迅速增大, 这时车辆的运动状态需要由质心侧偏角和横摆角速度同时表示. 在车辆稳定性控制算法中, 不同的公司倾向于不同的控制, 如德国博世 (Bosch) 的 ESP 主要采用横摆角速度控制, 估计的质心侧偏角在特殊工况下才使用; 而丰田 (Toyota) 和本田 (Honda) 则采用质心侧偏角控制.

车辆动力学系统是一个复杂的非线性时变系统, 其动力学性能受行驶速度、路况等因素的影响较大, 而在线路运行环境中存在着大量的不确定因素,

所以本文将研究车辆的不确定模型. 在文献[4, 5]的基础上, 假定车辆参数未知, 同时状态不可测, 用 Backstepping 方法^[6]设计输出反馈自适应控制器, 最终达到输出信号对理想信号的渐近跟踪效果, 同时保持闭环自适应系统信号有界.

2 车辆动力学模型

图 1 为四轮非线性车辆动力学模型, 选取固定于车辆质心的坐标系建立车辆运动学方程. 该模型考虑了车身纵向、侧向和横摆 3 个方向的运动, 轮胎受到的侧向力和纵向力由非线性轮胎模型产生. 考虑车辆的侧向载荷和纵向载荷转移, 描述车辆运动的动力学方程可表述如下^[2]:

侧向运动

$$m(\dot{v} + ur) = F_{Y1} + F_{Y2} + F_{Y3} + F_{Y4}, \quad (1)$$

纵向运动

$$\dot{r} = l_f(F_{Y1} + F_{Y2}) - l_r(F_{Y3} + F_{Y4}) + M_z, \quad (2)$$

收稿日期: 2007-11-29; 修回日期: 2008-04-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60674027); 教育部博士点基金项目 (20050446001).

作者简介: 陈长芳 (1982—), 女, 山东莒南人, 博士生, 从事非线性系统控制、车辆控制的研究; 武玉强 (1962—), 男, 山东沂水人, 教授, 博士生导师, 从事变结构控制、控制系统仿真等研究.

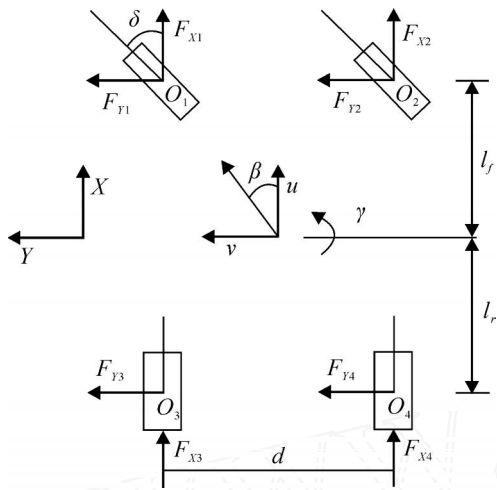


图1 车辆动力学模型

纵向运动

$$m(u - vr) = F_{X1} + F_{X2} + F_{X3} + F_{X4}. \quad (3)$$

附加的横摆力矩

$$M_z = \frac{d}{2} (F_{X2} - F_{X1} + F_{X4} - F_{X3}). \quad (4)$$

其中： m 为车辆质量； I 为车身横摆运动的转动惯量； r 为车辆横摆角速度； u 和 v 分别为车辆纵向运动与侧向运动速度； l_f 和 l_r 分别为车辆质心到前轴和后轴的距离； F_x 和 F_y 分别为轮胎受到的纵向力和侧向力； d 为轮距； M_z 为附加的横摆力矩，由控制律决定其数值， M_z 可由左右轮胎受到的制动或驱动力的差产生。

二自由度的车辆模型被称为自行车模型，因其反映了车辆运动的本质性能，故在车辆动力学研究中得到了广泛的应用^[4,5]。该车辆模型具有侧向和横摆运动两个方向的自由度，可用以下两个方程描述^[4,5]：

$$mu(\dot{\gamma} + r) = -2(c_f + l_f r/u - \dot{\delta}) - 2c_r(\dot{\gamma} + l_f r/u), \quad (5)$$

$$I\dot{r} = -2c_f(l_f r/u - \dot{\delta})l_f + 2c_r(-l_f r/u)l_r + M_z. \quad (6)$$

其中： γ 为车辆的质心侧偏角， r 为车辆的横摆角速度， δ 为车辆的前轮转角， c_f 和 c_r 分别为前后轮胎的侧偏刚度。由式(5)和(6)，车辆状态方程可表述为

$$\dot{x} = Ax + BM_z + H. \quad (7)$$

其中

$$x = \begin{bmatrix} \gamma \\ r \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B = [b_1 \quad b_2]^T,$$

$$H = [h_1 \quad h_2]^T, a_{11} = -2(c_r + c_f)/(mu),$$

$$a_{12} = 2(l_r c_r - l_f c_f)/(mu^2) - 1,$$

$$a_{21} = 2(l_r c_r - l_f c_f)/I,$$

$$a_{22} = -2(l_r^2 c_r - l_f^2 c_f)/(Iu),$$

$$b_1 = 0, b_2 = 1/I,$$

$$h_1 = 2c_f/(mu), h_2 = 2c_f l_f/I.$$

3 控制器设计

3.1 输出为质心侧偏角

此时，输出表达式为

$$y = [1 \quad 0]x + rJ^T.$$

由状态方程(7)，传递函数表达式为

$$y = C^T(SI - A)^{-1}SI - A^{-1}(bM_z + h) = (b_1 s + b_0)(s^2 + a_1 s + a_0)^{-1}M_z + (h_1 s + h_0)(s^2 + a_1 s + a_0)^{-1}.$$

新的实现表达式为

$$\dot{x} = Ax + F^T, y = e^T x.$$

其中

$$A = [b_0 \quad a_1 \quad a_0 \quad h_1 \quad h_0]^T, e_1 = [1 \quad 0]^T,$$

$$F^T = \begin{bmatrix} 0 & -y & 0 & 0 \\ M_z & 0 & -y & 0 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

由于状态 x 不可测，应对状态进行滤波。滤波器设计如下：

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + ky, \quad (8)$$

$$\hat{x}^T = A_0^{-T} \hat{x} + F^T. \quad (9)$$

其中： $A_0 = A - ke^T$ ， A_0 是Hurwitz的，所以存在正定阵 P ，使得 $A_0^T P + PA_0 = -I$ 。

降低滤波器的阶次，设计降阶滤波器如下：

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + e_2 M_z, \quad (10)$$

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + e_2 y, \quad (11)$$

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + e_2, \quad (12)$$

其中 $e_2 = [0 \quad 1]^T$ 。可以得到滤波器(8)和(9)的状态 \hat{x} 和 \hat{x}^T 分别为 $\hat{x} = [\hat{\gamma} \quad \hat{r}]^T$ ， $\hat{x}^T = [\hat{\gamma} \quad \hat{r}]^T$ 。令估计误差 $\tilde{x} = x - (\hat{x} + \tilde{x})$ ，满足方程 $\dot{\tilde{x}} = A_0 \tilde{x}$ ，且 $\tilde{x}(0) = \tilde{x}(0)$ 。

记 \tilde{x}_1 为 \tilde{x} 的第2行，跟踪误差 $z_1 = y - \hat{y}_r$ ， $\tilde{x} = \tilde{x}_1 - \tilde{x}_2 \tilde{e}_1$ ， $0 = [0 \quad -y \quad 0 \quad 0]^T$ ， $\tilde{x}_1 = \tilde{x} + 0$ ， $\tilde{x}_2 = \tilde{x}_1 + \tilde{x}_1 \tilde{e}_1$ ， $\tilde{e}_1 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ 。

Backstepping 第1步：对跟踪误差求导可得

$$\dot{z}_1 = b_0(\dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_1 - \dot{\hat{y}}_r) + b_0 \tilde{x}_1 + b_0 \dot{\hat{y}}_r + \tilde{x}_2 + \tilde{x}_1 \tilde{e}_1 + \tilde{x}_2 - \dot{\hat{y}}_r.$$

作变量替换 $z_2 = \dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_1 - \dot{\hat{y}}_r$ 。其中： \tilde{x}_2 为 $1/b_0$ 的估计， $\tilde{x}_1 = 1/b_0 - \tilde{x}_1$ ， $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_1$ 。

取中间控制函数

$$\tilde{x}_1 = -c_1 z_1 - d_1 z_1 - \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 \tilde{e}_1.$$

定义第1个Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{x}_1^T \tilde{x}_1 + \frac{b_0}{2} \tilde{x}_2^2 + \frac{1}{d_1} \tilde{x}_1^T P.$$

计算 V_1 的导数，并取估计 $\tilde{x}_1 = -\text{sign}(b_0)(\dot{\tilde{x}}_r + \tilde{x}_1) z_1$ ， $\tilde{x}_1 = (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1(\tilde{x}_1 + \dot{\tilde{x}}_r)) \tilde{e}_1$ 。得到

的值相对不大,使车辆动力学系统更好地适应车速和路况的变化,鲁棒性强.

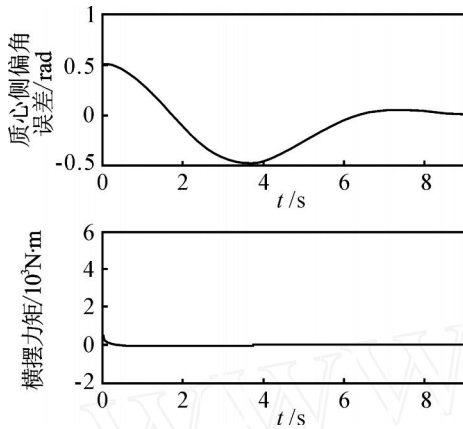


图2 质心侧偏角误差曲线和控制律曲线

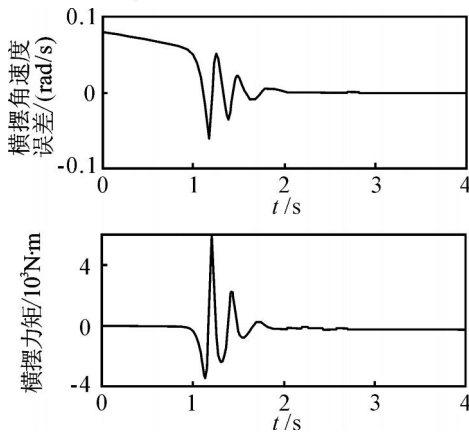


图3 横摆角速度误差曲线和控制律曲线

比较两种控制方法可以看出,质心侧偏角控制收敛速度相对较慢,但是控制器响应快,即:一旦车辆的质心侧偏角偏离其理想值,控制器会在瞬间输出一个较大的横摆力矩来纠正这种误差.而横摆角速度控制收敛快,但由于惯性力矩的作用,控制器的

响应滞后了一段时间.这两种控制方法都能使车辆动力学系统趋于稳定,提高车辆的安全性.

6 结论

车辆动力学系统是复杂的非线性时变系统,其动力学性能受车速、路况等因素的影响较大.因此,本文考虑了含有不确定时变参数的车辆动力学模型,设计了输出反馈自适应控制器,通过控制车辆的主动横摆力矩来提高车辆的稳定性和安全性.尚待考虑的问题是如何减小瞬时横摆力矩的大小,并缩短系统的过渡时间.

参考文献(References)

[1] Motoki Shino, Masao Nagai. Yaw-moment control of electric vehicle for improving handling and stability[J]. JSAE Review, 2001, 22(4): 473-480.

[2] Shuibo Zheng, Houjun Tang, Zhengzhi Han, et al. Controller design for vehicle stability enhancement[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(12): 1413-1421.

[3] Masato Abe, Yoshio Kano, Kazuasa Suzuki, et al. Side-slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment[J]. JSAE Review, 2001, 22(4): 413-419.

[4] Esmailzadeh E, Goodarzi A, Vossoughi G R. Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling[J]. Mechatronics, 2003, 13(7): 659-675.

[5] Goodarzi A, Esmailzadeh E. Design of a VDC system for all-wheel independent drive vehicles[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2007, 12(6): 632-639.

[6] Miroslav Krstic, Ioannis Kanellakopoulos, Petar Kokotovic. Nonlinear and adaptive control design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1999: 285-484.

下期要目

分数阶控制研究综述	朱呈祥, 邹云
传感器网络中自顶向下的轮廓监控算法	信俊昌, 王国仁
非最小相位逐维定位多模型自适应解耦控制器	王昕, 等
基于 DESO 的 Mean Shift 目标跟踪算法研究	王晓卫, 等
传感器网络中无线电干涉定位系统的多径误差分析	黄艳, 等
面向冗余机器人实时控制的逆运动学求解有效方法	潘博, 等
一种新的雷达和红外融合算法	曾宪伟, 等
网络化控制系统综合控制方法研究	康军, 戴冠中
自适应分区多代理模型交互式遗传算法	孙晓燕, 巩敦卫