

采用2-自由度调节器结构的制动方向稳定性控制算法

晏蔚光¹, 张卫冬², 陈全世¹

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 结合直接横摆力矩控制和主动前轮转向控制, 设计了一种提高制动方向稳定性的复合控制系统. 控制器采用2-自由度调节器结构, 将前轮转向角视为输入, 将作用于车身的外部侧向干扰力视为扰动, 通过2-自由度调节器将转向跟随控制和抗扰控制分离, 并对制动控制参数进行了优化. 文章对有转向输入和路面突变情况下的控制器控制性能进行了仿真研究, 并与无方向稳定控制的仿真结果进行了对比. 仿真试验证实这种控制方法在提高车辆制动稳定性方面有良好的效果.

关键词: 2-自由度调节器; 跟随控制; 抗扰控制; 直接横摆力矩控制; 主动前轮转向

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Control algorithm with two-degrees-of-freedom regulator to improve braking lateral-stability

YAN Wei-guang¹, ZHANG Wei-dong², CHEN Quan-shi¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A compound controller was proposed to improve braking lateral-stability by integrated control of direct yaw-moment control and active front steer. The controller was designed with two-degrees-of-freedom (2-DOF) structure. Front steer angle and external lateral-force acted on the vehicle were regarded as input and disturbances, respectively. So tracking control for steering and disturbance rejection control were uncoupled by the 2-DOF regulator. Braking parameters of the control system were optimized as well. Control performance with steering input and mutation of road condition were investigated by simulation, and the results were compared with those without control. It was verified that the controller is effective on improving lateral stability of vehicle during brake.

Key word: two-degrees-of-freedom (2-DOF) regulator; tracking control; disturbance rejection control; direct yaw-moment control (DYC); active front steer (AFS)

1 引言(Introduction)

汽车制动性能的评价指标包括制动距离和制动方向稳定性等几方面. 防抱制动系统(ABS)虽然能够在一定程度上缩短制动距离, 但由于控制算法中没有考虑轮胎的侧滑, 因此并不能根本解决汽车制动的方向稳定性问题. 近些年提出了直接横摆力矩控制(DYC)、四轮转向控制(4WS)等控制技术, 基本上都是恒速条件下提高车辆操纵稳定性的方法. 由于转向输入会使转向跟随控制与制动时的抗扰控制相互关联, 并且制动过程中轮胎载荷的变化会使控制性能恶化, 目前这些操纵稳定性控制方法在制动方向稳定性方面做的研究还很少^[1,2].

本文将直接横摆力矩控制和主动前轮转向(AFS)控制结合, 采用2-自由度调节器结构控制方式, 将转向跟随控制与制动力抗扰控制分离; 同时, 对制动力和方向稳定控制参数进行优化, 提出一种制动方向稳定控制方法.

2 汽车运动模型(Vehicle model)

由于汽车质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 的系数含有纵向速度 v_x , 若同时考虑 β , γ , v_x 的控制, 汽车动力学模型将为非线性系统. 为此将对汽车纵向速度控制与侧偏控制分离, 简化侧向运动模型为线性时变系统.

忽略空气阻力、滚动阻力、转向系统和悬架系统

3.2 转向跟随控制器设计 (Design of tracking controller for steering)

取跟随控制器和抗扰控制器的输出分别为 u_f , u_b , 满足关系

$$u = u_f + u_b. \quad (9)$$

利用跟随控制器补偿非零转向角引起的误差, 得到

$$u_f = -B^{-1}[(A - A_d)x_d + (E - E_d)\delta_f']. \quad (10)$$

3.3 抗扰控制器设计 (Design of disturbance rejection controller)

将式(9)(10)代入(8), 整理得

$$\dot{e} = Ae + Bu_b + Nz. \quad (11)$$

由于 M_n 不能直接测量, 需要构建扰动状态观测器. 采用内模原理构建扰动状态观测器和镇定补偿器, 得到增广系统, 控制器结构如图3所示.

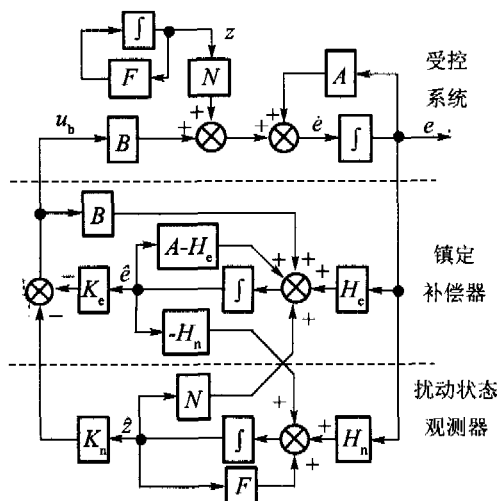


图3 带扰动状态观测器的反馈控制结构

Fig. 3 Feedback controller with disturbance state observer

重构状态反馈的控制规律为

$$u_b = -[K_e \quad K_n][\hat{e} \quad \hat{z}]^T. \quad (12)$$

其中: K_e 和 K_n 分别为镇定矩阵和伺服矩阵, $\hat{e}$, $\hat{z}$ 分别为 e , z 的重构状态.

取外部扰动的函数形式为 $z = Fz$, 增广系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{e}} \\ \dot{\hat{z}} \end{bmatrix} = \bar{A} \begin{bmatrix} \hat{e} \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \bar{B} u_b + \bar{H} e. \quad (13)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A - H_e & N \\ -H_n & F \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{H} = \begin{bmatrix} H_e \\ H_n \end{bmatrix}$$

由镇定补偿器与受控系统构成闭环系统, 按期望动态性能配置极点, 代入特征方程 $A - BK_e$, 求解出镇定矩阵 K_e . 同时, 为实现对扰动作用的静态无差补偿, 应满足 $N = BK_n$, 由此解得伺服矩阵

$$K_n = B^{-1}N. \quad (14)$$

由式(13)得到 $\dot{\hat{z}} = -H_n \hat{e} + F\hat{z} + H_n e$.

记 $e_z = \hat{z} - z$, 则

$$\dot{e}_z = \dot{\hat{z}} - \dot{z} = H_n e + F e_z - H_n \hat{e}. \quad (15)$$

令 $\varepsilon = \begin{bmatrix} e \\ e_z \end{bmatrix}$, 则由式(11)(12)(15)整理得到

$$\dot{\varepsilon} = \bar{A}\varepsilon + \bar{B}u_e. \quad (16)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & -N \\ H_n & F \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, u_e = \begin{bmatrix} -BK_e \\ -H_n \end{bmatrix} \hat{e}.$$

采用最优控制理论求解上述问题, 性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\varepsilon^T Q \varepsilon + u_e^T R u_e) dt. \quad (17)$$

其中, 系数矩阵 $Q = Q^T > 0$, $R = R^T > 0$. 采用最优控制理论求解得到系数矩阵 H_e, H_n .

4 制动控制参数优化 (Optimization of braking parameters)

汽车纵向运动方程为

$$m(\dot{v}_x - v_y \gamma) = (F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f + F_{x3} + F_{x4} - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \delta_f. \quad (18)$$

考虑到前轮转向角较小时, 可以近似认为 $\cos \delta_f \approx 1$, $\sin \delta_f \approx \delta_f$. 代入上式, 整理得到

$$\dot{v}_x = \frac{1}{m} [F_x - (F_{y1} + F_{y2}) \delta_f] + v_x \beta \gamma. \quad (19)$$

其中 $F_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}$

在制动过程中, 制动控制系统在保证制动稳定性的同时, 应保证制动距离尽可能最短. 建立优化性能指标为

$$J = \int_{t_0}^{t_f} v_x dt. \quad (20)$$

系统存在下列约束条件

$$-\mu_i F_{xi} \leq F_{xi} \leq 0. \quad (21)$$

其中

$$F_{x1} = \frac{1}{2(l_f + l_r)} (mgl_r - mv_x h - \frac{2F_y h l_r}{w}),$$

$$F_{x2} = \frac{1}{2(l_f + l_r)} (mgl_r - mv_x h + \frac{2F_y h l_r}{w}),$$

$$F_{x3} = \frac{1}{2(l_f + l_r)} (mgl_f + mv_x h - \frac{2F_y h l_f}{w}),$$

$$F_{x4} = \frac{1}{2(l_f + l_r)} (mgl_f + mv_x h + \frac{2F_y h l_f}{w}),$$

$$F_y = m \frac{v_x^2}{\rho} = mv_x (\dot{\beta} + \gamma).$$

轮胎侧偏力和侧偏角之间存在着非线性关系. 当侧偏角的幅值大于某一数值时, 侧偏力会出现饱和. 为了降低系统的控制难度, 需要将侧偏角控制在饱和点以内, 以便采用线性模型简化轮胎侧偏模型. 在控制器设计中, 当侧偏力要求大于轮胎侧偏饱和值时, 需要控制前轮侧偏角保持在饱和点对应的数值, 即

$$-\alpha_{\max} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}. \quad (22)$$

其中

$$\alpha_{\max} = \min(|\alpha_{s1}|, |\alpha_{s2}|),$$

$$\alpha_{si} = -\operatorname{sgn}(F_{yi}) \frac{2\mu F_{xi}}{C_i}, i = 1, 2.$$

式(4)中的上式和式(1)代入式(22), 整理得

$$\beta + \frac{l_f \gamma}{v_x} - \delta'_f - \alpha_{\max} \leq \Delta \delta_f \leq \beta + \frac{l_f \gamma}{v_x} - \delta'_f + \alpha_{\max}. \quad (23)$$

同时, 车轮制动力与前轮转向修正角满足关系式(4)和(9).

5 仿真试验(Simulation)

为了检验控制系统性能, 讨论以下两种情况: 有转向输入的情况下的紧急制动; 由单一路面跃变到对开路面的紧急制动. 车辆模型参数为 $m = 1490 \text{ kg}$, $I = 2350 \text{ kgm}^2$, $w = 1.52 \text{ m}$, $l_f = 0.98 \text{ m}$, $l_r = 1.59 \text{ m}$, $h = 0.52 \text{ m}$, $C_f = 74800 \text{ N/rad}$, $C_r = 85060 \text{ N/rad}$.

5.1 转向输入(Steering input)

车辆以初速度 54 km/h 制动, 路面附着系数为 0.4 . 0.5 s 后由方向盘向前轮输入转向角, 其函数曲线如图4(a)所示. 图4(b), (c)分别为车辆质心侧偏角、横摆角速度仿真曲线, 可见采用2-自由度调节器控制, 能够明显提高车辆制动时的方向稳定性. 控制的制动距离为 55.327 m , 对制动控制参数优化后, 制动距离为 54.518 m .

由参考模型状态方程可知, 系统稳态时,

$$\frac{dy}{dv_x} = \frac{K(Kl_f - ml_r v_x^2)}{(Kl_f + ml_r v_x^2)^2}. \quad (24)$$

其中 $K = C_f(l_f + l_r)$.

即, 当纵向速度在 $0 \leq v_x < Kl_f/ml_r$ 范围内时, γ 随 v_x 的增大而增大; 当 $v_x \geq Kl_f/ml_r$ 时, γ 随 v_x 的增大而减小. 图4(c) 参考模型的横摆角速度曲线也验证了这一点.

车辆质心横摆角速度 γ 的这种变化, 使质心侧偏角 β 的控制值在 γ 变化转折时刻附近出现一定程度的波动, 如图4(b) 所示, 这种波动降低了车辆制动过程中的方向稳定性.

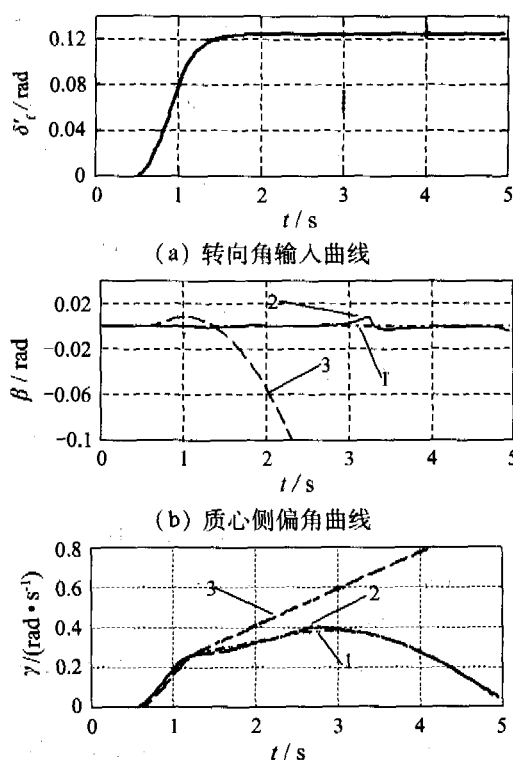
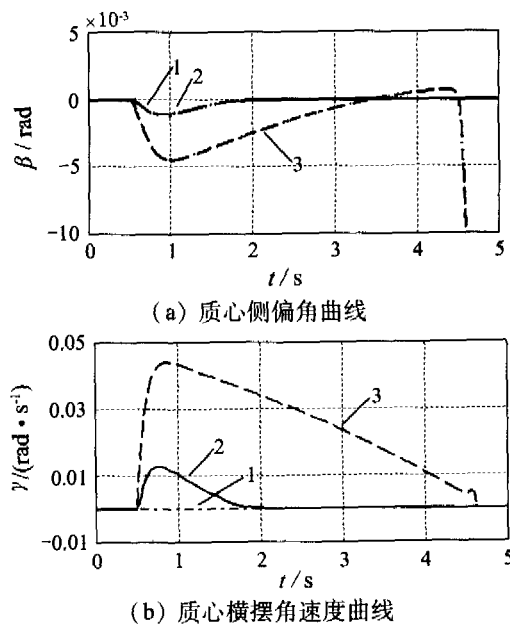


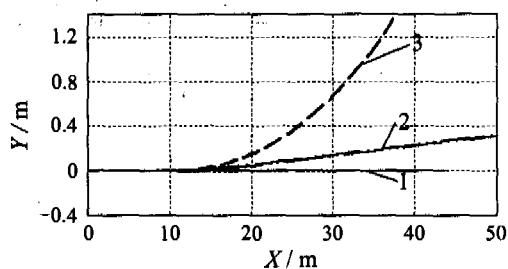
图4 转向输入响应仿真结果
1——理想运动曲线; 2——复合控制运动曲线;
3——无控制运动曲线

Fig. 4 Simulation of response to steering input

5.2 路面跃变(Mutation of road condition)

车辆以初速度 54 km/h 制动, 路面附着系数为 0.4 . 0.5 s 后跃变到对开路面, 左侧路面附着系数为 0.4 , 右侧路面附着系数为 0.3 . 图5为路面跃变情况下的运动状态参数及运动轨迹仿真结果. 由图5(c)可以得出结论, 采用复合控制可以大大降低路面跃变引起的侧向偏移量.





(c) 质心运动轨迹

1——理想运动曲线; 2——复合控制运动曲线;
3——无控制运动曲线

图5 路面突变响应仿真结果

Fig. 5 Simulation of response to mutation of road condition

6 结论(Conclusion)

将侧向稳定控制与汽车防抱制动系统结合,将会改善汽车制动的方向稳定性,对提高汽车制动性能将是非常有益的。

将直接横摆力矩和主动前轮转向控制应用于制动方向稳定性控制,可以改善紧急制动条件下的转向输入响应特性和存在扰动力矩情况下的操纵性能,提高车辆的制动稳定性。

采用2-自由度调节器结构,可以实现系统抗扰控制和跟随控制的解耦,利用抗扰控制补偿侧向扰动力和力矩的作用,利用跟随控制器修正转向输入。该结构降低了控制器的复杂程度,改善了控制性能,并提高系统控制能力。

车辆侧向稳定参考模型在车速变化时的特性存

在一定不足,如何降低车速对参考模型特性的影响,将是今后研究工作的内容之一。

参考文献(References):

- [1] PARK K, HEO S J, BAEK I. Controller design for improving lateral vehicle dynamic stability [J]. *JSAE Review*, 2001, 22(4): 481-486
- [2] HORIUCHI S, OKADA K, NOHTOMI S. Improvement of vehicle handling by nonlinear integrated control of four wheel steering and four wheel torque [J]. *JSAE Review*, 1999, 20(4): 459-464.
- [3] VILANOVA R, SERRA I. Realisation of two-degrees-of-freedom compensators [J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 1997, 144(6): 589-595
- [4] 安部正人[日]. 汽车的运动与操纵[M]. 陈辛波,译. 北京:机械工业出版社,1998:174-188
(ABE Masato. *Vehicle Dynamics and Control* [M]. Translated by CHEN Xinbo. Beijing: Mechanic Industry Press, 1998: 174-188.)

作者简介:

晏蔚光 (1974—),男,在清华大学汽车工程系做博士后研究,主要从事电动汽车防抱制动系统、制动稳定性控制以及整车系统设计方面的研究, E-mail: weiguang_yan@yahoo. con. cn;

张卫冬 (1974—),男,博士,主要从事电动汽车车辆控制方面的研究, E-mail: zhangweidong007@sina. con;

陈金世 (1945—),男,教授,主要从事新能源汽车领域关键技术的研究, E-mail: chenqs@tsinghua. edu. cn.