

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.048

基于 MPC 的汽车转向与悬架集成控制研究

崔滔文^{1,2}, 王帅印¹, 曹雨祥¹, 翟宇龙¹, 瞿元², 刘家宝²

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 奇瑞汽车股份有限公司 智能矢量控制实验室, 安徽 芜湖 241009)

摘要:转向与悬架系统对汽车操纵稳定性和行驶平顺性均具有重要影响,而且两者相互耦合。单系统控制的叠加难以发挥底盘控制潜力。围绕底盘系统综合控制效果提升课题建立整车动力学模型与路面模型等,构建集成系统控制框架,设计基于模型预测控制的转向与悬架集成控制器并完成仿真验证。研究结果表明:相较于单系统控制,集成控制下车辆的横摆角速度、车身侧倾角、悬架动挠度等控制效果得以改善,车辆操纵性和行驶平顺性得以提高。

关键词:汽车;主动转向;主动悬架;集成控制;MPC 预测控制

中图分类号:U463 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0255-05

Reserch on Integrated Automobile Control of Steering and Suspension Based on Model Predictive Control

CUI Taowen^{1,2}, WANG Shuaiyin¹, CAO Yuxiang¹, ZHAI Yulong¹, QU Yuan², LIU Jiabao²

(1. College of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Intelligent Vector Technology Control Lab, Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241009, China)

Abstract: The steering and suspension systems have a significant impact on vehicle handling stability and ride comfort and are coupled with each other, and the combination of two single system controls makes it difficult to unleash the potential of chassis control. In order to improve the comprehensive control effect of automotive chassis systems, this paper establishes vehicle dynamics model and road model, constructs integrated system control framework, and designs and stimulates the steering and suspension integrated controller based on MPC. The research results indicate that the control effects of integrated control on vehicle yaw rate, body roll angle, and suspension dynamic deflection, etc. as well as the comprehensive performance of vehicle handling and ride comfort are improved compared to single system control.

Keywords: automobiles; active steering; active suspension; integrated control; MPC predictive control

0 引言

近年来,伴随着电控技术的发展,主动转向(active steering system, AFS)、主动悬架(active suspension system, ASS)等主动控制技术相继应用在汽车上,提高了汽车的操纵稳定性和行驶平顺性^[1-2]。但是,这也使得汽车底盘控制技术愈加复杂。一方面,汽车底盘系统涉及纵横垂等多个方向的运动,转向、悬架等系统相互影响、相互耦合^[3]。另一方面,主动转向附加转角、主动悬架作动力控制及自身结构的复杂性也增加了底盘系统的控制难度。

目前,对于主动转向与主动悬架系统的研究主要集中在单个系统的控制上。在主动转向控制方面,结合车辆当下状态信息及驾驶员意图,对车

辆转向传动比或附加转角进行控制,提高车辆的路径跟踪性能和行驶稳定性^[4-6];在主动悬架控制方面,考虑来自路面的垂向作用力,通过悬架作动力的主动控制,抑制车辆的横摆和侧倾,控制车身姿态,提升车辆的行驶平顺性^[7-9]。这些研究通常忽视主动转向与主动悬架之间的相互影响,其预测控制也仅仅局限于单个系统的研究。然而,转向与悬架的协同控制是主动转向与主动悬架集成系统研究的核心问题。因此,有必要探索主动转向与主动悬架系统集成控制策略。

基于此,本文建立包含主动转向与主动悬架系统的整车模型、轮胎模型和路面模型,提出基于模型预测控制的集成控制策略,并将集成控制与单独控制下车辆操纵稳定性和行驶平顺性进行对比分析。

基金项目:安徽省自然科学基金项目(2508085QE144);中央高校科研资助项目(JZ2023HGTA0190)

第一作者简介:崔滔文(1992—),男,安徽合肥人,硕士研究生导师,博士,研究方向为汽车系统动力学与控制, nuaa_ctw@126.com。

$$F_{y2} = k_2 \alpha_2 = k_2 \left(\frac{b \omega_r}{u} - \beta + E_r \varphi \right) \quad (16)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为前轮、后轮的侧偏刚度; α_1 、 α_2 分别为前轮、后轮的侧偏角; E_f 、 E_r 分别为前侧倾转向系数和后侧倾转向系数; δ 为前轮转角; β 为滑移角。

1.3 路面模型

采用滤波白噪声作为路面输入模型^[14]:

$$\dot{z}_{gi} = -2\pi f_0 z_{gi} + 2\pi \omega_i \sqrt{G_0 u} \quad (17)$$

式中: G_0 为路面不平度系数; ω_i 是均值为 0 的白噪声; f_0 为下截止频率。

2 AFS 与 ASS 集成控制器设计

2.1 集成控制系统模型

综合以上转向、悬架、轮胎以及路面模型,可以得到:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_1 U + B_2 \omega \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (18)$$

式中: A 为状态矩阵; B 为控制矩阵; C 为输出矩阵; D 为直接转移矩阵。

取系统的状态变量为

$$X = [\beta \quad \omega \quad z_s \quad \dot{z}_s \quad z_{u1} \quad z_{u2} \quad z_{u3} \quad z_{u4} \quad \dot{z}_{u1} \quad \dot{z}_{u2} \quad \dot{z}_{u3} \quad \dot{z}_{u4} \quad \theta \quad \varphi \quad \dot{\theta} \quad \dot{\varphi}] \quad (19)$$

控制输入量为

$$U = [\delta \quad f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4] \quad (20)$$

路面输入为

$$\omega = [Z_{g1} \quad Z_{g2} \quad Z_{g3} \quad Z_{g4}] \quad (21)$$

系统的输出变量为

$$Y = [z_{s1} - z_{u1} \quad z_{s2} - z_{u2} \quad z_{s3} - z_{u3} \quad z_{s4} - z_{u4} \quad \ddot{z}_s \quad \omega \quad \theta \quad \varphi] \quad (22)$$

2.2 MPC 控制器设计

本文采用 MPC 控制方法,并对状态量进行滚动预测,在这个过程中通常忽略地面输入的影响。因此集成系统的连续状态空间方程可以描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (23)$$

由于输出变量可以由状态变量直接得到,为了简化滚动预测过程,此处省略 Du ,运用 1 阶差商方法将上式进行离散化处理,可以得到:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_k x(k) + B_k u(k) \\ y(k+1) = C_k x(k) \end{cases} \quad (24)$$

针对集成模型的离散化状态方程,构建新的状态向量 $\xi(k | t) = [x(k) \quad u(k-1)]^T$,得到一

个新的状态空间表达式^[15]:

$$\xi(k+1) = \tilde{A}_k \xi(k) + \tilde{B}_k \Delta u(k) \quad (25)$$

$$\eta(k) = \tilde{C}_k \xi(k)$$

$$\text{式中: } \tilde{A}_k = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ 0_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}; \tilde{B}_k = \begin{bmatrix} B_k \\ I_m \end{bmatrix}; \tilde{C}_k = [C_k \quad 0];$$

$0_{m \times n}$ 表示全为 0 的矩阵; I_m 表示 m 维的单位矩阵。

根据式 (25) 进行预测可以得到^[16-19]:

$$Y = \Psi \xi(k) + \Theta \Delta U \quad (26)$$

系统的目标函数可以表达为

$$J = \Delta U^T (\Theta^T Q_Q \Theta + R_R) \Delta U + 2(\Theta^T Q_Q \Theta - Y_{\text{ref}}^T Q_Q \Theta) \Delta U + Y_{\text{ref}}^T Q_Q Y_{\text{ref}} - 2Y_{\text{ref}}^T Q_Q E + E^T Q_Q E \quad (27)$$

式中: $Q_Q = I_{N_p} \otimes Q$; $R_R = I_{N_p} \otimes R$; $E = \Psi \xi(k)$, 其中 $\otimes$ 表示 Kroneck 乘积; Q_Q 和 R_R 分别是输出权重与控制量的权重。

MPC 的优化求解问题转化为二次型规划问题:

$$\begin{cases} \min_{\Delta U} \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + g^T \Delta U \\ \text{s.t.} \quad \Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max} \\ U_{\min} \leq A_k \Delta U + U_t \leq U_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 分别为控制时域内控制量的最小值、最大值集合^[20]; $\Delta U_{\min}$ 、 $\Delta U_{\max}$ 分别为控制时域内控制增量的最小值、最大值集合; A_k 为 $N_c \times N_c$ 下三角矩阵。

对于转向与悬架的集成控制,所用评价指标为 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$ 、 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 $\ddot{z}_s$ 、 ω_r 、 $z_{s1} - z_{u1}$ 、 $z_{s2} - z_{u2}$ 、 $z_{s3} - z_{u3}$ 、 $z_{s4} - z_{u4}$ 。其中, ω_r 的理想值设为当前驾驶员输入时等速圆周运动状态下车辆的横摆角速度,其余评价指标的理想值均为 0^[21-22]。

3 Carsim/Simulink 联合仿真

3.1 仿真工况与主要参数

设汽车以 $u = 10 \text{ m/s}$ 驶过不平度系数为 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^{-1}$ 的路面。驾驶员输入如图 4 所示,正弦输入的幅值为 80,并在 4.5 s 处有 1 s 的停留。仿真车辆所用参数如表 1^[23-24] 所示。

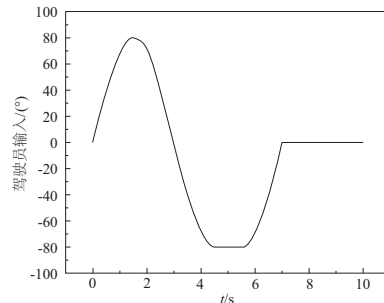


图 4 驾驶员输入

表1 仿真车辆参数

参数	数值
整车质量/kg	1 412
悬挂质量/kg	1 270
非悬挂质量/kg	35.5
前悬架刚度/(N/m)	27 000
后悬架刚度/(N/m)	30 000
横向稳定杆角刚度/(Nm/rad)	6 695
前悬架阻尼系数/(N·s/m)	897.2
后悬架阻尼系数/(N·s/m)	769.4
轮胎垂向刚度/(N/m)	138 000
前轮侧偏刚度/(N/m)	108 319
后轮侧偏刚度/(N/m)	114 890
前轮到质心距离/m	1.015
后轮到质心距离/m	1.895
车身侧倾转动惯量/(kg·m ²)	536.6
车身俯仰转动惯量/(kg·m ²)	1 536.7
车身横摆转动惯量/(kg·m ²)	1 536.7

3.2 仿真结果分析

本文基于MPC控制方法,比较了转向单独控制、悬架单独控制以及集成控制条件下车辆操纵性及平顺性的差异。其中,转向单独控制采用评价指标 ω_r ,理想值为当前驾驶员输入时车辆等速圆周运动状态下的横摆角速度。悬架单独控制时,评价指标为悬架垂向加速度、俯仰角、侧倾角以及各车轮处的悬架动挠度,其理想值均设为0。仿真结果如图5—图9及表2所示。

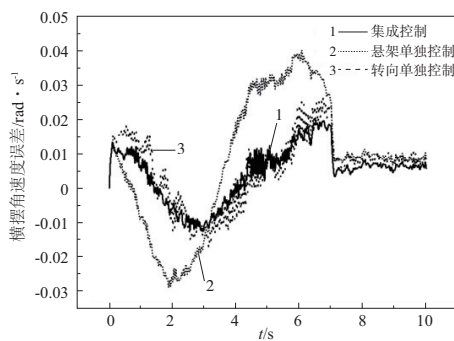
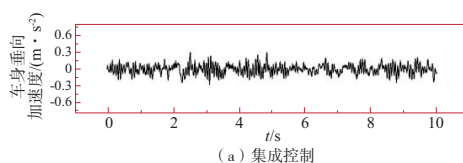
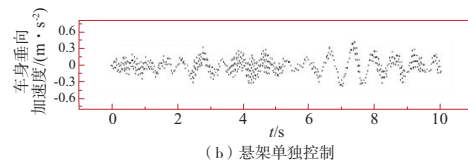


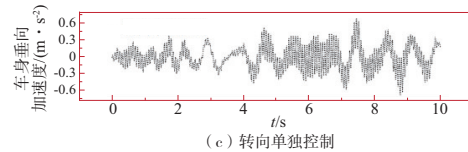
图5 横摆角速度误差



(a) 集成控制



(b) 悬架单独控制



(c) 转向单独控制

图6 悬架垂向加速度

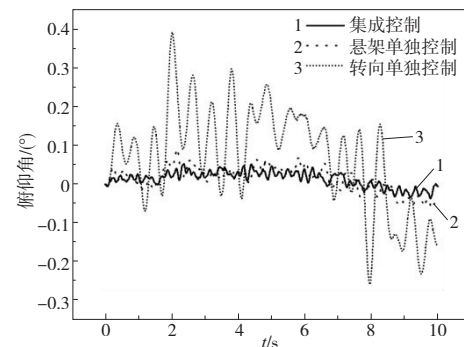


图7 俯仰角

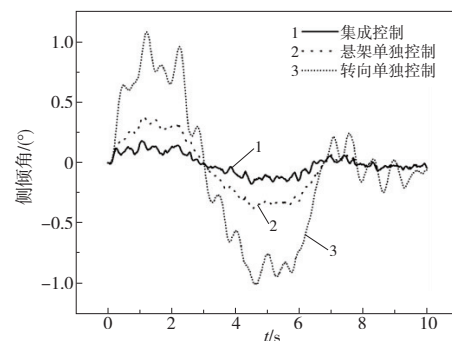
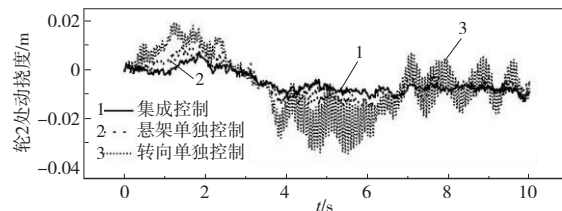
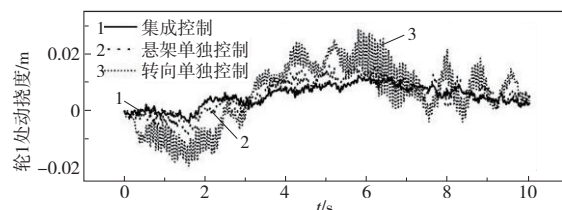


图8 侧倾角



(a) 轮2



(b) 轮1

图9 前轮动挠度

表2 仿真数据分析

指标		转向单独	悬架单独	集成控制
横摆角 速度差值	均值	0.005 8	0.008 3	0.004 6
	峰值	0.026 6	0.040 1	0.019 6
	方差	9.66×10^{-5}	3.62×10^{-4}	6.30×10^{-5}
车身垂向 加速度	均值	0.002	8.550×10^{-4}	-2.230×10^{-4}
	峰值	0.723	0.449	0.292
	方差	0.044 1	0.008 9	0.006 4
车身 俯仰角	均值	0.071	0.015	0.015
	峰值	0.392	0.009	0.054
	方差	0.017	0.001	3.780×10^{-4}
车身 侧倾角	均值	-0.062	-0.024	-0.010
	峰值	1.078	0.375	0.181
	方差	0.311	0.045	0.007
轮1处悬 架动挠度	均值	0.005 9	0.005 8	0.005 3
	峰值	0.028 4	0.016 3	0.012 6
	方差	1.20×10^{-4}	3.25×10^{-5}	1.46×10^{-5}
轮2处动 悬架挠度	均值	-0.006 0	-0.005 0	-0.005 0
	峰值	0.019 6	0.009 8	0.007 4
	方差	1.44×10^{-4}	4.16×10^{-5}	1.99×10^{-5}

在车辆操纵性上,结合图5和表2可知,转向单独控制与集成控制改善了转向系统对横摆角速度的跟踪效果。相比转向单独控制,集成控制进一步提高了转向系统的操纵性,车辆横摆角速度均值降低了20.7%,峰值降低了26.3%,方差减小了34.8%。

在行驶平顺性上,结合图6—图9及表2可知,悬架单独控制与集成控制使得车辆在车身垂向加速度、车身侧倾角、车身俯仰角、质心垂向加速度等评价指标上较转向单独控制有极大改善。与悬架单独控制相比,集成控制在悬架垂向加速度、侧倾角等指标上表现更好,其中,悬架垂向加速度方差降低了28.1%,侧倾角均值减低了58.3%,俯仰角均值降低4.6%。

由上述可知,与转向单独控制和悬架单独控制相比,转向与悬架的集成控制可以更好地改善车辆操纵性和乘坐舒适性。

4 结语

本文建立了主动悬架系统在转向工况下的动力学模型、轮胎模型和路面模型,搭建了转向与悬架集成系统控制模型,设计了基于MPC的集成控

制器并进行仿真验证。仿真结果表明:转向与悬架集成控制与转向单独控制和悬架单独控制相比可以有效提高车辆操纵性,改善转向过程中的车身垂向加速度、悬架动挠度,车身俯仰角与侧偏角等指标,提高了车辆的行驶平顺性。

参考文献:

- [1] WU Y, WANG L F, ZHANG J Z, et al. Robust vehicle yaw stability control by active front steering with active disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2019, 233(9): 1127-1135.
- [2] 王天婷, 杨标, 宋志鹏, 等. 乘用车主动前轮转向系统的控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 123-126.
- [3] 王启瑞, 刘立强, 陈无畏. 基于随机次优控制的汽车电动助力转向与主动悬架集成控制[J]. 中国机械工程, 2005, 16(8): 743-747.
- [4] CHO J, HUH K. Active front steering for driver's steering comfort and vehicle driving stability[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(3): 589-596.
- [5] 王其东, 姜武华, 陈无畏, 等. 主动悬架和电动助力转向系统机械与控制参数集成优化[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 67-72.
- [6] 陈无畏, 王妍旻, 王其东, 等. 电动助力转向与主动悬架系统多变量自适应集成控制[J]. 振动工程学报, 2005, 18(3): 360-365.
- [7] FUNKE J, BROWN M, ERLIEN S M, et al. Collision avoidance and stabilization for autonomous vehicles in emergency scenarios[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1204-1216.
- [8] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制第2版[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.
- [9] XU T, ZHAO Y Q, WANG Q W, et al. An adaptive inverse model control method of vehicle yaw stability with active front steering based on adaptive RBF neural networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(11): 13873-13887.
- [10] KIM J, LEE T, KIM C J, et al. Development of data-based model predictive control for continuous damping and air spring suspension system[J]. Control Engineering Practice, 2024, 142: 105777.
- [11] KIM J, LEE T, KIM C J, et al. Model predictive control of a semi-active suspension with a shift delay compensation using preview road information[J]. Control Engineering Practice, 2023, 137: 105584.

(下转第270页)

- 收稿日期:2024-01-23

- [12] WU H, GAO Q, WANG C, et al. Decoupling control of chassis integrated system for electric wheel vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(6): 1515-1531.
- [13] ZHAO W P, GU L. Hybrid particle swarm optimization genetic LQR controller for active suspension [J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8204.
- [14] ZHANG B, ZHAO W Z, LUAN Z K, et al. An antiroll control strategy based on time-varying nonlinear MPC for three-axle steering/braking-by-wire vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9): 11048-11060.
- [15] WANG P, ZHANG X Y, SHI J P, et al. Rollover prevention control of electric vehicles based on multi-objective optimization coordination under extreme conditions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10): 12784-12798.
- [16] ZHANG H C, WANG S, ZHAO X, et al. Path tracking and handling stability coordinated control of 4WS and DYC for distributed in-wheel motor drive electric vehicle under extreme conditions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(12): 18402-18417.
- [17] ZHANG Z D, ZHENG L, LI Y N, et al. Cooperative strategy of trajectory tracking and stability control for

- 收稿日期:2023-11-13