

文章编号:1000-582X(2012)07-019-06

汽车 ESC 系统主环-伺服环分层结构控制策略

张 为¹, 王伟达², 丁能根³, 李春里¹

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 北京理工大学 车辆传动国家重点实验室, 北京 100081;
3. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对提高车辆操纵稳定性的电子稳定控制系统(ESC)的控制问题, 提出了主环-伺服环分层结构的 ESC 控制策略。主环控制器采用一阶滑模控制算法, 设计了滑模面和滑模控制律, 其输出为保持车辆稳定性所需的车身附加横摆力矩。伺服环控制器采用近似模拟人类思维的九点五态控制算法, 通过控制制动压力实现期望的制动滑移率, 从而产生附加横摆力矩。设计了具有实时视景反馈功能的驾驶员在环仿真平台, 对分层控制策略进行了在线测试。测试结果表明, 提出的 ESC 控制策略显著地提高了低附着路面或驾驶员过度操作车辆等工况的操纵稳定性和主动安全性, 驾驶员在环仿真方法提高了测试的真实性和开发控制策略的针对性。

关键词: 先进车辆控制系统; 动力学系统; 电子稳定控制; 分层控制结构; 滑模控制; 驾驶员在环仿真

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

The main-loop and servo-loop structure control strategy of ESC

ZHANG Wei¹, WANG Weida², DING Nenggen³, LI Chunli¹

(1. China Academy of Transportation Sciences, Ministry of Communications, Beijing 100029, China;
2. National Key Laboratory of Vehicle Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the control of electronic stability control system(ESC) which can enhance the handling stability in limited condition, the hierarchical control structure control strategy of ESC including main-loop and servo-loop is proposed. The first order sliding mode control is used in the main-loop and the sliding mode plane and control law are designed. The output of main-loop is the accessional yaw-moment. The nine-points with five states control which can approximately simulate human thinking is used in the servo-loop. The brake pressure is controlled by the servo-loop aiming at the desired slip rate and the accessional yaw-moment is generated by brake force. The driver-in-the-loop simulation bench is designed and the online test of the control strategy is carried on. The test results indicate that the handling stability and active safety are enhanced remarkably by the ESC control strategy in the drive condition of low adhesion road and driver handling vehicles immoderately, and the testing facticity and the pertinency of developed control strategy are improved by the driver-in-the-loop simulation.

Key words: advanced vehicle control systems; dynamic systems; electronic stability control; hierarchical control structure; sliding mode control; driver-in-the-loop simulation

收稿日期: 2012-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005017)

作者简介: 张为(1981-), 男, 博士, 主要从事车辆动力学及其控制、智能车辆与交通的研究。

王伟达(联系人), 男, 博士, 主要从事车辆动力学及其控制、混合动力车辆的研究, (E-mail) wangwd0430@163.com。

电子稳定控制系统 (electronic stability control system, 简称 ESC) 是在车辆稳定性的理论分析基础上提出的直接对汽车横摆运动进行控制的新型车辆动力学电子控制系统。它通过采集转向盘转角的信息来判断驾驶员的转向意图, 并通过控制制动力或驱动力在车轮上的分配产生主要横摆力矩来调节汽车的横摆运动, 以保证汽车的稳定性, 从 20 世纪 90 年代末开始, ESC 的研究逐渐成为汽车主动安全控制研究的热点^[1-3]。

车辆动力学稳定性控制系统的典型实现方式之一就是直接横摆力矩控制 (direct yaw-moment control, 简称 DYC), 是指通过改变车辆左右侧车轮纵向制动力或驱动力, 利用两侧轮胎纵向力的差异产生一个合适的横摆力矩, 用以控制车辆的横摆运动与侧向运动。这种控制方式的研究主要始于 20 世纪 90 年代初日本学者 Shibahata 对于车身侧偏角与车辆运动稳定横摆力矩非线性关系的探讨。德国的博世公司以 DYC 控制方式开发了 ESP 系统, 并成功地实现了大规模产业化应用^[4-5]。Yoshioka 将滑模控制理论应用于 VDC 中, 仿真表明滑模控制比 PID 控制对于横摆速率具有更强的鲁棒性; 滑模控制对车身结构、路面和车速等变化能有效确定控制所需的附加横摆力矩。Mokhiamar 采用最优控制理论, 研究了利用转向角前馈控制和横摆角速度反馈控制的 VDC 控制方式, 并比较了有/无侧向速度反馈控制的控制性能。韩国 Park 等研究了 VDC 的控制算法, 提出以中性转向特性作为控制目标, 以左右侧轮胎纵向力之差产生的横摆力矩为控制变量。该控制算法以汽车质心侧偏角和横摆角速度作为状态变量, 采用前馈-反馈复合控制结构, 通过前馈控制补偿转向输入引起的底盘转向运动, 在反馈控制中采用线性二次型最优控制理论计算横摆力矩以保持车辆运动稳定性^[6-8]。国内清华大学、上海交通大学、重庆大学、吉林大学等也开展了 ESC 的控制策略和系统仿真研究工作, 清华大学、上海交通大学、吉林大学等联合汽车企业进行了基本原理试验, 但离实际应用还有很大距离^[9-12]。

笔者在分析 ESC 系统控制需求的基础上, 提出主环-伺服环分层结构的 ESC 控制策略, 设计驾驶员在环仿真平台, 在有真实驾驶员操作的情况下对控制策略进行在线测试, 验证控制策略的有效性。

1 ESC 系统控制结构

根据相关研究表明^[13], 无论是驾驶员对于车辆的操控输入 (转向盘转角输入、制动/油门踏板输入

等), 还是车辆动力学稳定性控制系统的作用输入 (各个轮缸的制动压力调节、前轮或四轮侧偏角调节等), 其最终控制效果的实现都是通过轮胎与地面接触部分之间的作用力完成的。因此, 设计的车辆动力学稳定性控制策略有以下两个方面: 一是从“被控对象”(车辆)层面上如何决策出合适的附加横摆力矩, 二是从“执行器”(轮胎)层面上采用何种方式产生所需的附加横摆力矩。

因此, 为了使控制算法结构清晰, 便于维护及算法的集成、功能扩展和升级, 参考博世公司的控制方案, 采用一种分层控制结构, 分步设计从控制目标到最终执行机构的控制, 提出“主环-伺服环”的分层控制结构, 具体结构如图 1 所示。

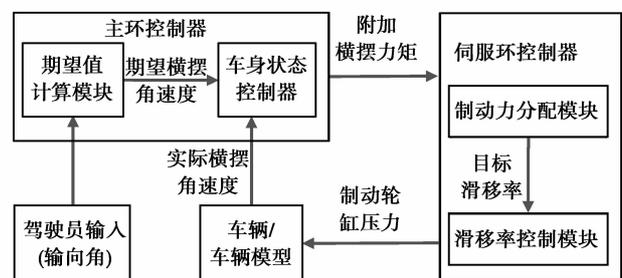


图 1 系统控制结构图

主环控制器主要解决从车辆(被控对象)层面上的附加横摆力矩决策问题, 以实现车辆运动状况的合理调控, 伺服环控制器的目的是实现主环控制器所需的附加横摆力矩, 具体就是通过“执行器”的调节产生相应车轮的纵向滑移率, 以实现主环的控制目标。虽然两个环路的控制目标有所区别, 却紧密相关。主环的控制算法需要有足够的鲁棒性与容错性, 以适应伺服环执行过程中不可避免的力跟踪误差与延迟; 然而, 若过多地追求控制算法对于误差和不确定建模的容忍能力, 必然会牺牲相当程度的控制性能(这里主要是指精度)。因此, 需对两个层次的控制算法、控制参数在综合评估的基础上进行合理选取, 在控制性能与鲁棒性之间合理折衷。

2 基于滑模控制的主环控制器设计

滑模控制系统设计的基本要求是同时满足滑动模态的存在性、可达性并且其滑动模态具有渐进稳定性和良好的动态品质。

滑模控制器的设计包括两个相对独立的部分:

1) 设计切换函数(滑模面) $s(x)$ 。目前常用的切换函数设计方法有极点配置法、系统零点设计法、二次型最优法、特征结构配置法等。

2)设计滑动模态控制律 $u(x)$, 确保可达性条件的成立, 从而保证在切换面上形成滑动模态区。

质心侧偏角和横摆角速度是车辆稳定性的两个重要状态变量。基于控制策略的不同, 可单独控制这两个变量, 也可将质心侧偏角和横摆角速度联合进行控制。以线性二自由度车辆模型为基础, 基于滑模控制理论以横摆角速度为控制参考量设计车身运动状态控制器(主环控制器)。

2.1 滑模面设计

在车辆动力学稳定性研究中都以线性二自由度车辆模型得到的运动参数作为车辆 ESC 系统中控制变量的期望值。主环控制器是根据相应的控制策略对车辆在合适的时机施加一定附加横摆力矩 M_u , 故修正后的二自由度车辆模型表达式为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{k_1 + k_2}{mu} \beta + \left(\frac{ak_1 - bk_2}{mu^2} - 1 \right) r - \frac{k_1}{mu} \delta_f, \\ \dot{r} = \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u} r - \frac{ak_1 \delta_f}{I_z} + \frac{M_u}{I_z}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\beta, \dot{\beta}$ 为车辆质心侧偏角及角速度; r, \dot{r} 为车辆横摆角及角速度; m 为整车质量; u 为车辆纵向速度; k_1, k_2 为前后轮胎侧偏刚度; a, b 为车辆质心到车辆前轴和后轴的距离; δ_f 为前轮转角; I_z 为整车绕 z 轴的转动惯量。

主环控制器的目标是使车辆的实际横摆角速度 r 和期望横摆角速度 r_t 的跟踪误差 $e = r_t - r$ 为零。根据前述内容, 车辆 ESC 系统中横摆角速度期望值 r_t 的计算公式为

$$r_t = \begin{cases} r_d, & |r_d| \leq r_u, \\ r_u \operatorname{sgn}(\delta_f), & |r_d| > r_u, \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$r_d = \frac{u/L}{1 + Ku^2} \delta_f, r_u = 0.85 \frac{ug}{u},$$

式中: L 为车辆轴距; K 为车辆稳定性因数; μ 为路面峰值附着系数。

滑模面的选择应当能够实现控制变量的目标值跟随, 据此定义滑模面为

$$s = e. \quad (3)$$

显然, 滑模变量 s 趋近于零, 等价于实际横摆角速度和期望横摆角速度之间的跟踪误差 e 趋近于零。

2.2 切换函数及控制律设计

滑模控制器中的切换函数一般取误差的符号函数, 即 $\operatorname{sgn}(s)$ 。

根据式(1)-(3)推导得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{r}_t - \dot{r} = \\ \dot{r}_t - \left(\frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u} r - \frac{ak_1 \delta_f}{I_z} + \frac{M_u}{I_z} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

为保证运动轨迹在有限时间内到达切换面并在一定程度上改善运动轨迹的动态品质。采用高为炳提出的“趋近律”方法中的等速趋近律来设计控制律^[14], 即

$$\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s), k > 0. \quad (5)$$

式中, k 为根据控制对象标定的控制参数。

将式(5)带入式(4), 得

$$\begin{aligned} \dot{r}_t - \left(\frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u} r - \frac{ak_1 \delta_f}{I_z} + \frac{M_u}{I_z} \right) = \\ -k \operatorname{sgn}(s). \end{aligned} \quad (6)$$

推导即可得到以横摆角速度为控制参考量的附加横摆力矩计算公式为

$$M_u = I_z \dot{r}_t - I_z \left(\frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u} r - \frac{ak_1 \delta_f}{I_z} \right) - I_z k \operatorname{sgn}(s). \quad (7)$$

3 伺服环控制器设计

采用的主环-伺服环控制结构, 可将整车动力学和轮胎力学进行解耦, 并将轮胎放在伺服环中作为一个典型的非线性执行机构来处理。主环控制器是从车身层面计算出合适的附加横摆力矩, 而伺服环控制器则从轮胎层面采用某种控制方式产生主环控制器所需的附加横摆力矩。实现主环控制器确定的附加横摆力矩控制方式有多种, 如调整车辆转向角、调节驱动力及差压制动。由于差压制动的应用易于实现且不需要增加额外部件, 因此在车辆 ESC 系统研究中较多采用。

3.1 期望制动滑移率的确定

差压制动通过选定合适的车轮进行制动产生需要的车身附加横摆力矩, 需求制动力通过调节轮胎滑移率实现。利用滑移率与纵向轮胎力的关系图, 通过查表与线性插值相结合确定不同附着系数路面上的期望滑移率。由于轮胎力的影响因素较多, 其中主要为路面附着系数, 确定轮胎力需要进行大量测试。而车辆动力学软件 veDYNA 提供了方便的测试环境, 可以得到不同路面附着系数条件下的轮胎力数据。将测试数据建立查表即可由需求制动力计算出期望滑移率。

3.2 滑移率的九点五态控制器

期望滑移率的实现需要通过 ESC 系统液压调节单元(HCU)的电磁阀和电机进行操作控制制

动缸压力,使得期望滑移率与实际滑移率的误差 $e_\lambda = \lambda_d - \lambda$ 趋近于零。但是由于轮胎的非线性特性及工况的不确定性增加了滑移率控制器的设计难度,单纯的依靠传统控制方式或现代控制理论都较难达到高质量的控制效果。武汉理工大学张南纶教授提出了一种无需系统的数学模型、根据系统的偏差和偏差变化率进行控制的九点控制器理论,又叫基本型逻辑控制器。

九点控制器的理论是对人类逻辑思维活动的一种近似模拟,是一种新型智能控制算法^[15]。该理论沿用了基于偏差和偏差变化的模糊控制思想,以相平面为分析工具,将对象在响应曲线上的运动轨迹通过相平面来进行分析;同时结合 PID 控制中比例(P)控制的特征,引进偏差零带(偏差允许的范围)和偏差变化率零带(偏差变化率允许的范围),并根据这两个因素将相平面分成九个区域,通过调节不同区域内 P 的大小(含有正负数)达到控制目的。在分析了九点控制理论的基础上利用其简化形式设计了滑移率的九点五态控制器。九点五态控制器的相平面如图 2 所示。

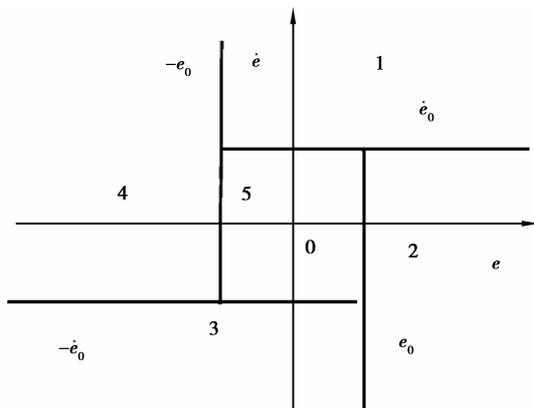


图 2 九点五态控制器的相平面图

假设期望滑移率与实际滑移率的误差 $e_\lambda = \lambda_d - \lambda$,将液压调节单元对应通道的控制状态与上述的相平面对应,得到滑移率的九点五态控制器控制策略,如表 1 所示。

表 1 九点五态控制器控制策略

$e_\lambda < -e_0$	$ e_\lambda \leq e_0$	$e_\lambda > e_0$
K_{2-}	K_0	K_{4+}
K_{4-}		K_{2+}

其中, $K_{4+}, K_{2+}, K_0, K_{4-}, K_{2-}$ 分别对应直接增

压、缓增、保压、减压和缓减操作,具体缓增、减压操作的控制周期和占空比需通过测试来进行标定。

4 驾驶员在环仿真

4.1 驾驶员在环仿真平台设计

对装有 ESC 系统的汽车而言,其稳定性的好坏取决于汽车、驾驶员以及控制器三者的相互作用。由于汽车是典型的强非线性系统,精确建立车辆模型比较困难,同时驾驶员模型很难准确模拟危险工况下的驾驶员反应。因此,将车辆系统中难以精确建模的液压制动系统部分、ESC 控制系统和真实的驾驶员均嵌入测试平台中,基于 MATLAB/Simulink 环境和车辆动力学软件 veDYNA 搭建了硬件在环和驾驶员在环仿真测试平台,对 ESC 的控制效果进行评估。

为了尽可能真实地接近实车试验工况,将实车的液压基础制动系统和 ESC 系统部分部件嵌入仿真测试平台,以实时视景显示虚拟试验车和道路的状态,并用真实的驾驶员通过转向盘、油门踏板、制动踏板等进行操作,虚拟试验车采用 TESIS 公司开发的 veDYNA 三维汽车动力学模型。驾驶员反馈系统使用 veDYNA 软件集成的 DYNAanimation 模块,以实时视景显示虚拟试验车和道路状态。接口系统采用 dSPACE 实时仿真系统及其 RTI 模块实现软硬件信息的交互。驾驶员在环仿真系统如图 3 所示。

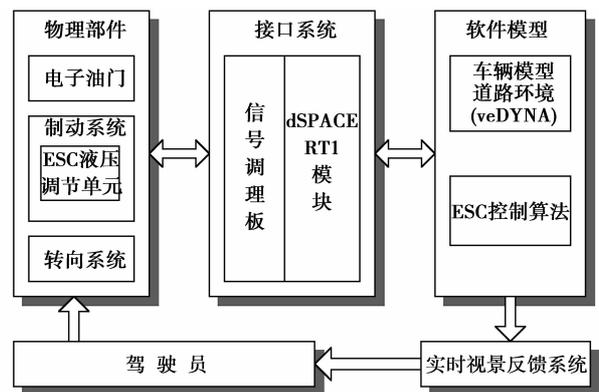


图 3 ESC 驾驶员在环仿真系统结构示意图

4.2 驾驶员在环仿真结果

真实的驾驶员通过前述的驾驶员操控系统对虚拟试验车进行操作。这样不仅仅是转向盘位置、油门踏板位置等信号由模型输入变为真实的驾驶员输入,更重要的是可通过实时视景实现了虚拟试验车与驾驶员的交互,体现了驾驶员的真实反应,更加接近实车试验工况。

采用的试验工况中,驾驶员以 55 km/h 的车速在最大路面附着系数为 0.3 的路面上做双移线操作,仿真结果如图 4~6 所示。

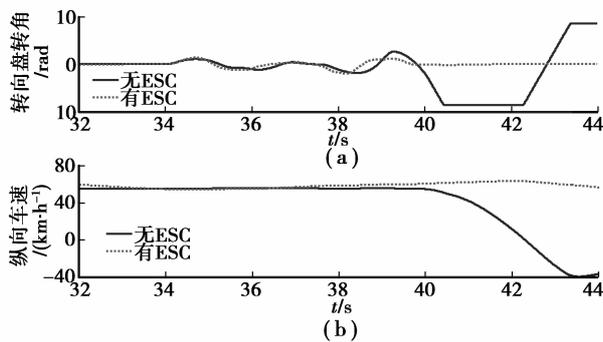


图4 转向盘转角及纵向车速曲线

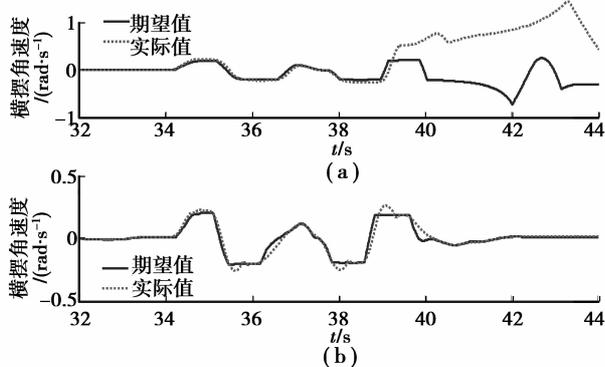


图5 横摆角速度响应曲线

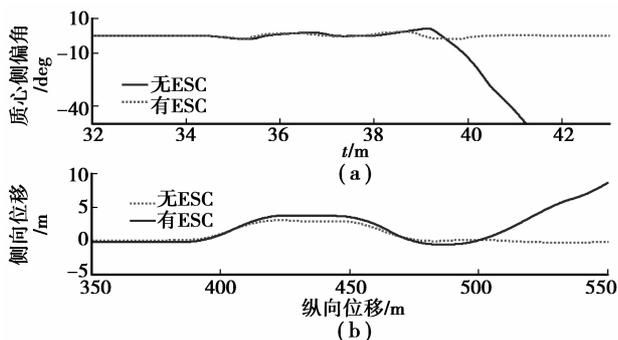


图6 质心侧偏角及位移曲线

根据车辆操纵稳定性理论,驾驶员在低附着路面上很难操控车辆。在无 ESC 时,车辆将呈现不稳定趋势并最终失稳;若有 ESC 的协助,则可实现对期望横摆角速度的跟随并完成双移线操作,质心侧偏角在稳定范围内。通过转向盘转角曲线可知,有了 ESC 的辅助,不需频繁、剧烈的操作转向盘,减轻了驾驶员的操作和心理负担,也对车辆驾驶安全性有利。

5 结论

1) 驾驶员在环仿真结果表明,研究的主环-伺服环分层结构的 ESC 控制策略实现了在低附着路面或驾驶员过度操作车辆等工况下的车辆稳定性控制,提高了车辆的操纵稳定性和驾驶安全性。

2) 主环-伺服环分层结构控制策略结构清晰,主环控制器设计时不考虑轮胎的非线性特性,而将车辆水平合力看成是车辆 ESC 系统的控制输入,这样降低了控制设计的难度;较难处理的轮胎非线性特性在伺服环轮胎滑移率控制中加以考虑,使控制需求得以实现。

3) 驾驶员在环仿真方法既可快速、便捷地完成 ECU 的在线测试,缩短开发周期、节约试验费用,又可比较真实地将驾驶员操作特性、液压制动系统响应特性等包含在 ESC 控制测试中,提高了测试的真实性和开发控制策略的针对性。

参考文献:

- [1] Furukawa Y, Abe M. Advanced chassis control systems for vehicle handling and active safety [J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 28(2): 59-86.
- [2] 黄炳华, 陈祯福. ESC 的最新动向和发展趋势 [J]. 汽车工程, 2008, 30(1): 1-9.
HUANG Binghua, CHEN Zhenfu. The current situation and development trends of ESC [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(1): 1-9.
- [3] Abe M, Kano Y, Suzuki K, et al. Side-slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment [J]. JSAE Review, 2001, 22(4): 413-419.
- [4] Van zanten A, Erhardt R, Pfaff G. VDC, the vehicle dynamics control system of Bosch [C] // Proceedings of the International Congress & Exposition, February 27-March 2, 1995, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International Technical Paper, 1995: 10. 4271/950759.

- [5] Van zanten A, Erhardt R, Landesfeind K, et al. VDC system development and perspective [C] // Proceedings of the International Congress & Exposition, February 29-March 4, 1998, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International Technical Paper, 1998: 10.4271/980235.
- [6] Shibahata Y, Shimada K, Tomari T. Improvement of vehicle maneuverability by direct yaw moment control[J]. Vehicle System Dynamics, 1993, 22(5/6): 465-481.
- [7] Park J H, Ahn W S. H_{∞} yaw-moment control with brakes for improving driving performance and stability [C] // Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic, Sep. 19-23, 1999, Atlanta, GA, USA. [S. l.]: IEEE Press, 1999: 747-752.
- [8] Mihoub M, Nouri A S, Abdennour R B. A real time application of discrete second order sliding mode control to a semi-batch reactor: a multimodel approach [J]. International Journal of Modeling, Identification and Control, 2009, 6(2): 156-163.
- [9] 邹广才, 罗禹贡, 李克强. 基于全轮纵向力优化分配的 4 WD 车辆直接横摆力矩控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 1-6.
ZOU Guangcai, LUO Yugong, LI Keqiang. 4 WD vehicle DYC based on tire longitudinal force optimization distribution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 1-6.
- [10] 李亮, 康铭鑫, 宋健, 等. 汽车牵引力控制系统的变参数自适应 PID 控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 92-98.
LI Liang, KANG Mingxin, SONG Jian, et al. Adaptive PID control with variable parameters for vehicle traction control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 92-98.
- [11] Zheng S B, Tang H J, Han Z Z, et al. Controller design for vehicle stability enhancement [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(12): 1413-1421.
- [12] 朱冰, 李幼德, 赵健, 等. 基于多变量频域控制方法的车辆底盘集成控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 14-17.
ZHU Bing, LI Youde, ZHAO Jian, et al. Integrated chassis control based on multivariable frequency domain in control methods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 14-17.
- [13] Shen X M, Li D F, Yu F. Study on vehicle chassis control integration based on general actuator-plant structure [C] // Proceeding of 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC06), August 20-24, 2006, Taipei, Taiwan. [S. l.]: [S. n.], 2006: 553-558.
- [14] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [15] 张峰, 张南纶, 曾亮. 九点控制器稳态控制策略分析[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(5): 71-74.
ZHANG Feng, ZHANG Nanlun, ZENG Liang. The analysis of control strategy nine-point controller [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(5): 71-74.

(编辑 王维朗)