汽车 DYC 模糊 PID 控制方法

王伟达 丁能根 徐向阳 张 为

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：直接横摆力矩控制 DYC(Direct Yaw-Moment Control)是提高汽车操纵稳定性特性的重要方法，其研究对于提高汽车的主动安全性具有重要意义. 在深入研究汽车操纵动力学和先进控制理论的基础上，设计了具有智能积分模块的模糊 PID(Proportion-Integral-Differential)控制器，将该控制方法应用于 DYC 控制. 建立了能够反映车辆转向工况基本动力学性质的车辆动力学模型，在 Simulink 环境下对开发的智能积分模糊 PID 控制器进行了仿真测试与分析. 仿真结果验证了算法的可行性和有效性，表明智能积分模糊 PID 控制方法可以实现较为理想的 DYC 控制效果，在该领域具有良好的应用前景.

关 键 词：模糊控制；车辆操纵；DYC 控制；Bialkowski 结构

中图分类号：U 461.6

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)07-0873-04

Fuzzy-PID control method of vehicular DYC

Wang Weida Ding Nenggen Xu Xiangyang Zhang Wei

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Direct yaw-moment control (DYC) is a very important methodology of enhancing the vehicle stability, and its research is of great significance for improving the active safety of vehicle. Based on the in-depth study of the vehicular handling dynamics and the advanced control theories, a fuzzy-PID controller with intelligent integral module was designed and applied for the DYC control. The vehicular dynamic model reflecting the basic dynamic characters of steering situation and the fuzzy-PID controller with intelligent integral module was established and simulated in the circumstance of Simulink. The simulation results validate the feasibility and effectiveness of this control algorithm, and indicate that it can realize perfect control of DYC. This control strategy is of a good prospect in this field.

Key words: fuzzy control; vehicles-steering; DYC control; Bialkowski structure

20 世纪 90 年代初，人们通过对车辆稳定性的理论分析，提出了直接对汽车横摆运动进行控制的概念. 最典型的为直接横摆力矩控制 DYC (Direct Yaw-Moment Control)，它通过采集转向盘转角的信息来判断驾驶员的转向意图，并通过制动力或驱动力在车轮上的分配来调节汽车的横摆运动，以保证汽车的稳定性，这标志着汽车稳定性控制概念的出现. 其中 Bosch 的 VDC 是其中比较典型的控制方法之一，它采用汽车实际运行状态与汽车理想运行状态的误差反馈来控制汽车的横摆力矩，并通过差压制动和/或对发动机的控制实现对汽车横摆运动的调节，这一控制方法也是现在汽车稳定性控制中较为常用的方法[1]. 2000 年 Bosch 公司把其 VDC 产品升级为 ESP (Electronic Stability Program)，进行横摆力矩控制的 DYC 是 ESP 系统的核心[2].

国内对汽车稳定性控制系统的应用与研究起步较晚，由于缺少试验条件，研究还不十分深入.

收稿日期：2008-06-05

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50475003)

作者简介：王伟达(1980—)，男，河北定州人，博士生，wangwd0430@163.com.

现在吉林大学、清华大学、上海交通大学和中国重汽集团、上海汇众汽车制造有限公司等单位也正在开展这方面的理论研究工作.上海交通大学和上海汇众公司合作,开始对开发的ESP样机进行试验,迈出了我国ESP产品开发的重要一步[3-6].在我国还未实现ABS等基础控制系统大规模产业化及ESP的重要执行机构——高度集成压力调节器研发没有取得突破的情况下,深入研究DYC控制机理和算法做好核心技术储备是目前我国DYC研究的重要工作.

本文在深入研究汽车操纵动力学和先进控制理论的基础上,设计了用于DYC控制的具有智能积分模块的模糊PID(Proportion-Integral-Differential)控制器,建立了复杂程度适中、能够反映车辆转向工况基本动力学性质的车辆动力学模型,对开发的智能积分模糊PID控制器进行了Simulink离线仿真,验证了算法的可行性和有效性.

1 车辆动力学模型

建立车辆动力学模型是进行DYC系统仿真、验证控制逻辑的基础.车辆模型要求既能准确的反映车辆基本动力学特性,又把模型复杂程度控制在一定范围便于分析与调试.在综合前人研究基础上,本文建立了包括4个车轮的转动、车辆横向、纵向和横摆运动在内的7自由度车辆模型.模型中考虑了由纵向和侧向加速度导致的载荷转移,以更真实地反映车辆的动力学本质.

轮胎所受的纵向力和侧向力可由Dugoff轮胎模型计算[7].K_x为轮胎纵向刚度,C_α为轮胎侧向刚度.轮胎纵向力F_x和侧向力F_y分别为

$$F_x = K_x \frac{s}{1+s} f(\lambda) \tag{1}$$

$$F_y = C_\alpha \frac{\tan\alpha}{1+s} f(\lambda) \tag{2}$$

式中,s为车轮滑动率;α为轮胎侧偏角;λ和路面附着系数μ有关,它与函数$f(\lambda)$分别定义为

$$\lambda = \frac{\mu F_z (1+s)}{2\sqrt{(K_x s)^2 + (C_\alpha \tan\alpha)^2}} \tag{3}$$

$$f(\lambda) = \begin{cases} (2-\lambda)\lambda, \lambda < 1 \\ 1, \lambda \geqslant 1 \end{cases} \tag{4}$$

式中,F_z为轮胎法向载荷.

2 模糊PID控制器设计

2.1 智能积分模糊PID控制方法

许多研究表明[6,8],对于DYC这类需要大量试验知识和经验的控制系统,采用模糊控制方法具有很大的优越性.模糊控制器是一种近年来发展起来的新型控制器,其优点是不要求掌握受控对象的精确数学模型,只需根据人工控制规则组织控制决策表并由该表决定控制量的大小.模糊控制器可以获得良好的动态特性,而静态性能可能不能令人满意.所以模糊PID方法被应用于DYC控制[9].

Bialkowski于1983年提出的模糊PID控制器由一个常规积分控制器和一个二维模糊控制器并联而成.采用常规积分控制器输出u_i($u_i = K_I \cdot \sum e_i$),二维模糊控制输出控制量u_f的加权和作为模糊PID控制器的总输出,可使系统成为无差模糊控制系统[9].

积分作用在一定程度上模拟了人的记忆特性,它"记忆"了误差的存在及其变化的全部信息.由这种积分作用产生的积分控制作用有以下缺点:①积分控制作用针对性不强,甚至有时不符合控制系统客观需要;②由于这种积分作用只要误差存在就一直进行积分,在实际中导致"积分饱和",会使系统的快速性下降;③这种积分控制的积分参数不易选择,而选择不当会导致系统出现振荡.造成上述积分控制作用不佳的原因在于:这种积分控制作用没有很好体现出有经验操作人员的控制决策思想.所以有学者研究了一种能够较好的模拟人的记忆特性及仿人智能控制的智能积分策略,它有选择的"记忆"有用信息,而"遗忘"无用信息,所以可很好地克服一般积分控制的缺点.它具有仿人智能的非线性积分特性[10].

一般引入智能积分作用的逻辑判断条件为:当本次采样时刻的误差e_n及误差变化率Δe_n具有相同符号,即$e_n \cdot \Delta e_n > 0$时,对误差进行积分;相反,e_n与Δe_n异号,即$e_n \cdot \Delta e_n < 0$时,对误差不进行积分.这就是引入智能积分的基本条件.但考虑到误差和误差变化的极值点,即边界条件,可把引入智能积分和不引进智能积分的条件综合如下:当$e_n \cdot \Delta e_n > 0$或$\Delta e_n = 0$且$e_n \neq 0$时,对误差积分;当$e_n \cdot \Delta e_n < 0$或$e_n = 0$时,不对误差积分.

这样引进的积分即为智能积分作用.智能积分模糊PID控制器的结构如图1所示.其中E为输入偏差;E_C为输入偏差变化率;U为输出量;K_e为输入误差量化因子;K_c为输入误差变化率量化因子;K_u为输出量比例因子;II(Intelligent Integral)为智能积分模块;y为测量值;R为参考值。智能积分环节首先判断是否符合智能积分条件,若符合条件则进行智能积分,否则不引入积分

作用[10].

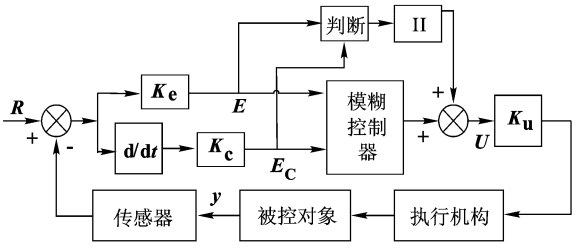


图 1　模糊 PID 控制器结构图

2.2　模糊控制器设计

模糊控制器设计包括:输入量(精确量)的模糊化处理、模糊规则设计、模糊推理方法确定及输出量的模糊判决(反模糊化).

在模糊控制器中,通常将偏差及偏差变化率作为输入语言变量,将控制量的变化作为输出语言变量.根据本文控制的需要,采用"正大"(PB)、"正中"(PM)、"正小"(PS)、"零"(O)、"负小"(NS)、"负中"(NM)、"负大"(NB)7 个语言变量值来描述.横摆角速度的偏差值一般在[−0.3,0.3](单位:rad/s)之间,超过这个范围则分别按−0.3 或 0.3 来处理.取量化因子为 20,则偏差值的论域为[−6,6].偏差变化率一般在[−0.8,0.8](单位:rad/s²)之间,超过这个范围则分别按−0.8 或 0.8 来处理.取量化因子为 10,则偏差变化率的论域为[−8,8].输出量为期望横摆力矩的变化量,取值范围为[−2 400,2 400](单位:N·m),取比例因子为 400,则论域为[−6,6].语言变量值在论域上的模糊子集由隶属函数描述,隶属函数的形态对控制效果有明显的影响.本文采用复合高斯隶属函数,该隶属函数控制精度较高.并且,在系统偏差较小或接近 0 时,采用具有高分辨率的窄型隶属函数,提高控制的灵敏度;在偏差较大的范围内,采用具有低分辨率的宽型隶属函数,提高控制的稳定性.

模糊控制规则采用以下模糊条件语句的形式,即

$$\text{if } E_{\mathrm{f}} \text{ and } E_{\mathrm{Cf}} \text{ then } U_{\mathrm{f}} \tag{5}$$

式中,E_{f} 为输入偏差变量模糊化的模糊集合;E_{Cf} 为输出偏差变化率变量模糊化的模糊集合;U_{f} 为输出变量的模糊化集合.该式反映了非线性比例加微分(PD)的控制规律.模糊推理的输出曲面如图 2 所示.

采用 Mamdani 型模糊推理方法进行模糊逻辑运算,采用重心法进行反模糊化计算.输出量精确值 z 的计算公式为

$$z=\sum_{i-1}^{n}u_{\mathrm{c}}(z_i)\cdot z_i\Big/\sum_{i-1}^{n}u_{\mathrm{c}}(z_i) \tag{6}$$

式中,$u_{\mathrm{c}}(z_i)$为输出量模糊集中元素 z_i 对应的隶属度.

利用 MATLAB7.1 中的 Fuzzy Logic Toolbox 设计了模糊控制器.本文构建的 DYC 控制系统的组成结构如图 3 所示.

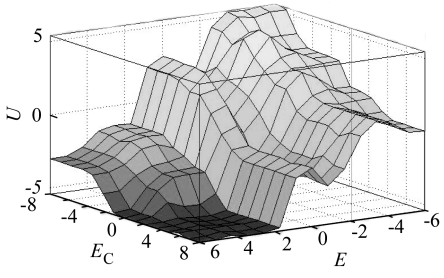


图 2　模糊推理输出曲面图

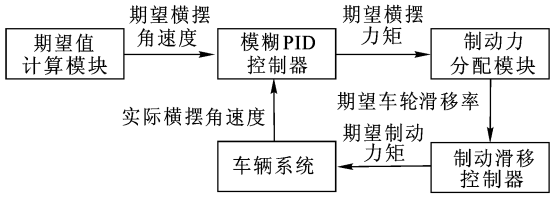
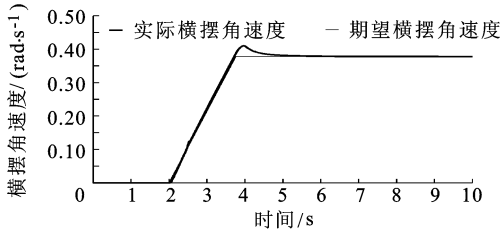


图 3　DYC 控制系统结构图

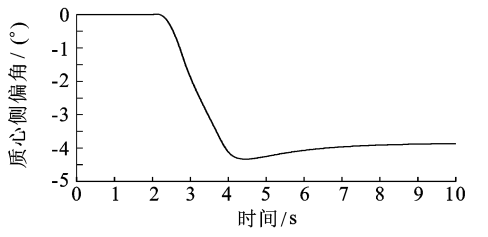
3　DYC 控制仿真及其结果分析

利用设计的模糊 PID 控制器和建立的车辆动力学模型,进行了 DYC 控制的仿真测试.测试工况分别为转向盘转角阶跃输入、转向操作和移线操作.

设定车辆速度为 20 m/s,并假设在车辆操纵过程中车速保持恒定;路面附着系数为 0.9.DYC 控制的车辆横摆角速度和车辆质心侧偏角曲线如图 4～图 6 所示.

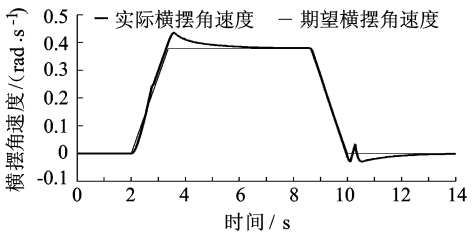


a　横摆角速度

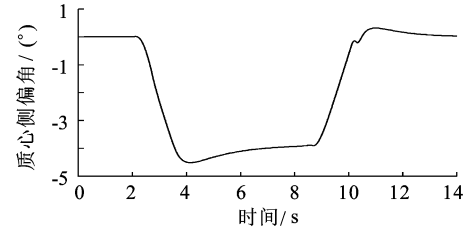


b　质心侧偏角

图 4　转向盘阶跃输入横摆角速度和车辆侧偏角曲线

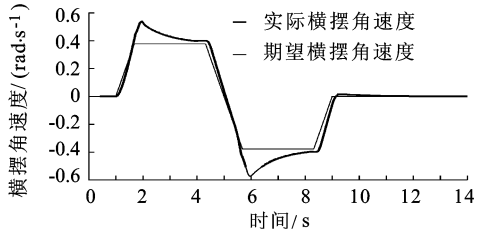


a 横摆角速度

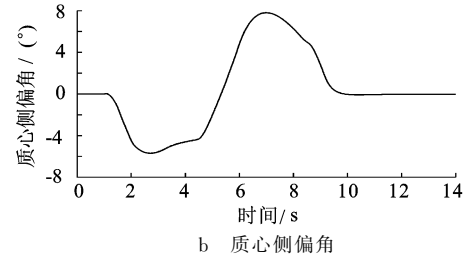


b 质心侧偏角

图5 转向盘转向输入横摆角速度和车辆侧偏角曲线



a 横摆角速度



b 质心侧偏角

图6 转向盘移线输入横摆角速度和车辆侧偏角曲线

实际情况表明:当车辆以20 m/s的速度在附着系数为0.9的道路上转向盘施加一个70°或更大的转角时,没有DYC控制的汽车横摆角速度急剧增大,车辆失去稳定性,转向意图完全不能实现.由图4～图6可知,如果施加DYC控制,转向盘阶跃输入、转向操作以及在高速进行转向盘操作较为频繁的移线时,车辆横摆角速度的实际值都能够很好的跟踪期望值.计算期望横摆角速度时,考虑了路面极限附着系数,所以在这种情况下车辆不会失去稳定性,并且转向意图得到了最大程度地实现.这体现了DYC最重要的控制功能.

4 结 论

本文在建立模糊PID控制器模型和车辆动力学模型的基础上,对DYC的模糊PID控制方法进行了仿真测试.主要结论如下:①控制曲线表明DYC控制可以明显的改善车辆在高速转向工况时的行驶稳定性,实际横摆角速度可以很好的跟随期望横摆角速度,在一定路面附着极限条件下最大限度的实现驾驶员的操作意图;明显的改善了车辆的可操纵性和稳定性.②在总结前人研究成果的基础上,把具有智能积分作用的模糊PID控制方法应用于DYC控制,测试结果显示控制效果良好,这表明智能积分模糊PID控制方法在DYC控制中有很好的应用前景.③测试结果中良好的控制效果表明所建立的DYC控制系统较为真实的反映了车辆系统的基本性质,验证了车辆动力学模型的合理性.

参考文献(References)

[1] Van Zanten A T. VDC, the vehicle dynamics control system of Bosch[R]. SAE 950759,1995

[2] Van Zanten A T. Bosch ESP system: 5 years of experience [R]. SAE 2000-01-1633,2000

[3] 贾豫东,宋健,孙群.用于电子稳定控制程序的汽车模型和控制策略[J].公路交通科技,2004,21(5):132－136
Jia Yudong, Song Jian, Sun Qun. Dynamic model and control method for motor vehicle with electronic stability program[J]. Journal of Highway and Transportion Research and Development, 2004, 21(5): 132－136 (in Chinese)

[4] 张宏兵,丁能根,王洪臣.基于协同仿真的单轨车辆动力学建模[J].北京航空航天大学学报,2007,33(6):736－739
Zhang Hongbing, Ding Nenggen, Wang Hongchen. Modeling of single track vehicle's dynamic based on co-simulation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(6): 736－739 (in Chinese)

[5] Zheng S B, Tang H J, Han Z Z, et al. Controller design for vehicle stability enhancement[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14:1413－1421

[6] 崔胜民,林清芝.基于模糊控制的汽车ESP建模仿真[J].农业装备与车辆工程,2007(5):17－19
Cui Shengmin, Lin Qingzhi. Study of fuzzy controlling theory for automobile ESP[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2007(5):17－19 (in Chinese)

[7] Dugoff H, Fancher P S, Segel L. An analysis of the tyre traction properties and their influence on vehicle dynamic performance[R]. SAE 700877, 1970

[8] Altrock G F, Krause B. Fuzzy logic and neurofuzzy technologies in embedded automotive applications[R]. IEEE-0-7803-1485-9,1993

[9] 陶永华.新型PID控制及其应用[M].第2版.北京:机械工业出版社,2005:101－148
Tao Yonghua. New PID control and application[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2005:101－148 (in Chinese)

[10] 李士勇.模糊控制·神经控制和智能控制论[M].(第2版).哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:451－464
Li Shiyong. Fuzzy control, neural control and intelligent control[M]. 2nd ed. Harbin: University of Harbin Industry Press, 1998: 451－464 (in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)