DOI: 10.3901/JME.2019.04.135

考虑人机协调的基于转向和制动可拓联合的 车道偏离辅助控制*

汪洪波 夏 志 陈无畏

(合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009)

摘要: 针对基于电动助力转向和差动制动的两种车道偏离辅助控制方法的局限性, 提出可拓联合控制策略。基于可拓控制理论, 充分考虑路面环境信息和车辆状态, 设计可拓联合控制器, 该控制器将电动助力转向和差动制动进行联合控制, 以实现车道偏离辅助。为解决车道偏离辅助过程中的人机协调问题, 应用模糊神经网络控制理论, 设计考虑驾驶员转矩和车辆侧向偏差的人机协调控制器, 通过输出辅助权重动态地调整车道偏离辅助系统的辅助转矩, 实现驾驶员与辅助系统的协调控制。在 CarSim/Simulink 联合仿真平台和 CarSim/LabVIEW 硬件在环试验台架上对所提出的控制策略进行仿真和试验验证, 结果表明所提出的控制策略能够有效地避免车辆偏离出车道, 同时降低驾驶员和辅助系统之间的相互干扰, 减小人机冲突, 有较好的人机协调性能。

关键词: 车道偏离辅助系统; 转向; 制动; 可拓控制; 人机协调

中图分类号: U461

Lane Departure Assistance Control Based on Extension Combination of Steering and Braking Systems Considering Human-machine Coordination

WANG Hongbo XIA Zhi CHEN Wuwei

(School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Aiming at the limitations of lane departure assistance control based on electric power steering system and differential braking system, an extension combination control strategy is proposed. Based on the extension control theory, the road environment information and vehicle state are fully considered in the design of the combination controller, and the controller combines the electric power steering and differential braking to realize the lane departure assistance control. In order to solve the problem of human-machine coordination in the process of departure assistance, the fuzzy neural network control is applied to design the human-machine coordination controller which considers the driver torque and the lateral deviation of the vehicle. It can adjust the assistant torque of the lane departure assistance system (LDAS) dynamically by outputting the weight so as to realize the coordinated control between the driver and the assistance system. These proposed control strategies are simulated and tested on the CarSim/Simulink combination simulation platform and the CarSim/LabVIEW hardware-in-the-loop test bench. The results show that the proposed control strategies can effectively avoid the vehicle deviating from the lane, reduce the mutual interference between the driver and the assistance system at the same time so that reducing the man-machine conflict, and have better human-machine coordination performance.

Key words: LDAS; steering; braking; extension control; human-machine coordination

0 前言

近年来, 随着人们对交通安全和智能辅助驾驶

的日益关注, 车道偏离辅助系统(Lane departure assistance system, LDAS)成为了国内外智能驾驶技术的研究热点^[1-3]。LDAS 是一种通过主动干预的方式来辅助驾驶员控制车辆, 以减少汽车因车道偏离而发生交通事故的系统。当驾驶员由于操作失误、注意力不集中或身体疲劳等原因引起车辆偏离车道时, LDAS 成为避免交通事故的有效手段。

目前, 实现车道偏离辅助控制的途径主要有两

* 国家自然科学基金(U1564201, 51305118, 51675151)、江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室开放基金(BM20082061504)和中国博士后科学基金(2016M602000)资助项目。20180531 收到初稿, 20181101 收到修改稿

种: 转向控制^[4-5]和差动制动控制^[6]。转向控制可分为转矩控制和转角控制。转矩控制基于转向系统给转向机构施加一个额外的转向力, 以实现辅助控制; 转角控制则需要通过转向系统控制车轮转到期望的角度来实现辅助控制。差动制动控制是将期望的制动压力分配到两侧车轮进行差动制动, 使得车辆横摆响应跟踪期望值并实现车道偏离辅助控制。

国内外学者对于车道偏离辅助控制的研究主要集中在车道偏离评价指标及预警决策算法、基于转向和差动制动的控制算法、驾驶员与辅助系统之间的协调控制等方面。

偏离决策算法是 LDAS 的上层控制, 研究人员在这一方面展开了研究。MAMMAR 等^[7]提出了一种基于跨道距离的跨道时间(Time to lane crossing, TLC)计算方法, 该 TLC 的计算考虑了车辆参数和位置信息, 并对其灵敏度进行了分析。车道偏离决策算法需要具有较好的预测性和准确性, 这有助于提升辅助系统的对多工况的适应性并减小误警率, 所以这将是人们研究的重点。

目前, 对于 LDAS 的研究大多采用的是转向控制。张海林等^[8]提出一种综合考虑跨道时间与驾驶员操作行为判断的车道保持协调控制方法。该方法通过判断驾驶员行为和车辆状态, 决定电动助力转向系统(Electric power steering, EPS)是实现常规助力转向还是响应来自车道保持控制器的命令, 实现了二者的协调控制。于立娇^[9]建立了包含驾驶员类型的车道偏离联合预警算法和基于电动助力转向系统的车道保持系统主动控制算法, 并通过仿真和试验验证联合预警算法和主动控制算法的有效性。当单独采用电动助力转向进行车道偏离辅助时, 车辆能够在多种工况下实现车道偏离辅助, 具有较强的适应性。然而, 采用转向控制作为车道偏离辅助的手段也存在一些问题, 例如, 线控转向成本过高, 驾驶员和辅助系统之间存在相互干扰、协调不一致和人机冲突的问题, 这有可能会加重驾驶员操纵负担, 影响汽车横向安全性。

采用差动制动对车道偏离辅助进行控制的方法在文献中还不多见。吴乙万等^[10]提出采用四轮差动制动对车辆施加辅助横摆力矩以避免车辆偏离车道的方法。该方法通过车路偏差、车辆状态和道路附着限制计算期望的横摆响应, 设计滑模控制器控制辅助横摆力矩, 达到车道偏离辅助控制的目的。刘剑^[11]根据制动系统特性提出分别利用轮缸压力闭环控制和滑移率均衡控制方法实现横摆力矩伺服控制。采用模糊控制器设计底层伺服控制器产生辅助横摆力矩, 达到车辆偏离辅助的目的。当单独采用

差动制动进行车道偏离辅助时, 可以大大降低驾驶员和 LDAS 之间的相互干扰。但是在某些工况下, 如路面附着系数较低时, 辅助效果不佳。

随着转向和制动控制在车道偏离辅助中应用的逐步深入, 二者集成作为车道偏离系统的执行部件也开始受到关注。GOODARZI 等^[12]提出了一种新的车道保持系统, 该系统集成了车辆的转向和制动系统并将其作为执行机构, 在保持车辆不偏离出车道的同时, 防止它变得不稳定。电机对转向轴施加主动转矩可以使车辆在一定程度上达到理想的轨迹, 并警告驾驶员保持车辆在车道上行驶。利用差动制动, 使车辆更灵活, 同时避免车辆出现失稳状态。WU 等^[13]提出一种具有分层结构的人机协同驱动控制器, 用于提升车辆的动态稳定性, 其分层结构包括监督层、协调层和执行层, 执行层包括主动转向控制和横摆力矩控制。目前, 有关这一方向的国内外研究很少, 所研究的内容也还不全面, 系统的集成度不高。所以, 车道偏离辅助系统中转向和差动制动的集成控制研究有着很大的空间和意义。

在人机协调控制方面, 谈东奎等^[14]针对车道偏离辅助系统转向控制中的人机协同问题, 提出了一种人机共享的决策与控制方法, 该方法通过主权分配模块切换人机控制主权, 由 EPS 电机进行执行, 进而实现 LDAS 的人机共享控制。MERAH 等^[15]设计了一个车道保持驾驶员辅助系统。文章建立了一个基于视觉的侧向控制模型, 计算侧向偏差和方向偏差, 并设计了模糊滑模控制器。基于驾驶员状态和车辆位置信息提出了一种新的人机共享控制策略, 该方法可以应用到车道保持系统或者车道偏离辅助系统中, 以减少驾驶员的工作量, 避免车辆偏离出车道。但是目前共享控制器的规则设计的较为简单, 对人机的主权分配考虑的还不完善。

根据上述分析可知, 单独采用转向控制时, 有比较好的控制效果, 但是存在人机协调的矛盾。当单独采用差动制动控制时, 不需要考虑人机协调问题, 驾驶员可以叠加转向操作, 但同时也存在某些工况下控制效果不佳的问题。同时, 采用转向系统和差动制动系统两者进行集成, 可以充分发挥两个系统的优势, 更好地提升车道偏离辅助控制系统的性能。因而, 本文提出可拓联合控制策略, 用于解决单独采用转向控制或差动制动控制进行车道偏离辅助的不足。进一步的, 基于模糊神经网络设计了一种人机协调控制器, 对上述人机协调控制进行了完善, 有效地实现了驾驶员和辅助系统之间协调控制, 使得车道偏离辅助系统在采用转向控制系统和差动制动控制系统集成后有最佳的控制性能。

1 建模

1.1 车道偏离判断模型

在车道偏离辅助的过程中，首先要判断车辆是否有偏离车道的危险。本文采用 TLC 作为车道偏离的判断算法。基于 TLC 的车辆偏离判断算法通过建立的车辆运动模型预测车辆行驶轨迹，从而计算出车轮接触到车道边缘所需的最小时间。当 TLC 小于设定的阈值时，说明车辆有偏离车道的危险，车辆迅速报警。此方法既考虑了车辆的当前位置，又兼顾了车辆的运动状态和未来趋势，具有很高的准确性。

获取当前时刻的车速、横摆角速度、航向角和车辆质心纵坐标等状态参数，计算跨道时间。计算方法参考文献[16]。TLC 的具体表达式为

$$TLC = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \theta - \arcsin \left(\frac{\frac{v}{\omega} \cos \theta - \frac{d_{lane}}{2} + \frac{L \sin \theta}{2} - y + \frac{d_b \cos \theta}{2}}{\frac{v}{\omega}} \right) \right) \quad (1)$$

TLC 的启动阈值主要由路况和车速等因素共同决定，如果 TLC 启动阈值过小可能导致即使辅助控制系统启动也无法将车辆纠回车道，不能有效地避免车辆偏出车道，从而发生事故；而阈值设定过大则可能造成系统的频繁启动，降低车辆的驾驶舒适性。本文综合考虑路况和车速，将 TLC 阈值设为 1.5 s。

1.2 驾驶员模型

本文选择单点预瞄最优曲率驾驶员模型^[17]来获取所需的最优转向盘转角。如图 1 所示， $f(t)$ 为车辆目标轨迹， $y(t)$ 为车辆当前位置侧向坐标， T 为预瞄时间。假设预瞄距离为 d ，预瞄时间与预瞄距离之间的关系为

$$T = \frac{d}{v} \quad (2)$$

图 1 单点预瞄模型

根据车辆侧向速度与车辆侧向加速度，可以预测 $t+T$ 时刻车辆位置的侧向坐标 $y(t+T)$ ，此时选择一个理想的转向角使得车辆产生侧向加速度 $\ddot{y}(t)$ ，在 $t+T$ 时刻车辆位置的侧向坐标 $y(t+T)$ 与目标轨迹的侧向坐标 $f(t+T)$ 相等，则可得

$$y(t+T) = y(t) + T\dot{y}(t) + \frac{1}{2}\ddot{y}(t)T^2 \quad (3)$$

$$f(t+T) = y(t+T) \quad (4)$$

联立式(3)和(4)可得最优侧向加速度

$$\ddot{y}(t) = \frac{2}{T^2} (f(t+T) - y(t) - T\dot{y}(t)) \quad (5)$$

根据车辆运动学关系，可以得到侧向加速度与转向盘转角之间的关系

$$\ddot{y} = \frac{v^2}{R} = \frac{v^2 \theta}{iL} \quad (6)$$

联立式(2)、(5)和(6)，可以得到跟踪目标轨迹所需的最优转向盘转角

$$\theta^* = \frac{2Li}{d^2} (f(t+T) - T\dot{y}(t) - y(t)) \quad (7)$$

1.3 参考车辆模型

本文选用二自由度车辆模型作为参考车辆模型^[11]，参考车辆模型根据驾驶员单点预瞄模型计算出的期望转角来确定期望的车辆运动状态。二自由度车辆模型的状态方程可描述为：

$$\begin{aligned} m v_x (\dot{\beta} + \omega) &= (k_f + k_r) \beta + \frac{1}{v_x} (l_f k_f - l_r k_r) \omega - k_f \delta_f \\ I_z \dot{\omega} &= (l_f k_f - l_r k_r) \beta + \frac{1}{v_x} (l_f^2 k_f + l_r^2 k_r) \omega - l_f k_f \delta_f + M_b \end{aligned} \quad (8)$$

式中 β ——汽车质心侧偏角；
 ω ——汽车横摆角速度；
 m ——整车质量；
 I_z ——汽车绕 z 轴的转动惯量；
 δ_f ——汽车前轮转角；
 M_b ——辅助横摆力矩；
 l_f, l_r ——质心到前后轴中心的距离；
 k_f, k_r ——前后轴等效侧偏刚度。

根据驾驶员单点预瞄模型获得的理想转角，可由二自由度车辆模型计算出理想的横摆角速度

$$\begin{aligned} \omega^* &= \frac{v_x / L}{1 + K_s v_x^2} \theta^* \\ K_s &= \frac{m(l_f k_f - l_r k_r)}{L^2 k_f k_r} \end{aligned} \quad (9)$$

为避免车辆失稳，在不同的路面状况下允许的

侧向加速度需要满足

$$|a_y| \leq \mu g$$

横摆角速度的期望值需控制在由路面附着因数所确定的范围内, 即

$$\omega^* = \min \left\{ \frac{v_x / L}{1 + K_s v_x^2} \theta^*, \frac{\mu g}{v_x} \right\} \quad (10)$$

2 可拓联合控制策略

本文提出一种基于电动助力转向和差动制动的联合控制策略, 将其应用到 LDAS 中。所设计的系统结构如图 2 所示, 分别为车道偏离决策层、可拓联合控制层和执行层。车道偏离判断模块根据输入的状态参数和环境信息计算出 TLC, 将 TLC 和设定的阈值进行对比, 判断车辆是否发生偏离; 如果车辆偏离出车道, 将启动 LDAS。控制层采用可拓联合控制策略, 在实现车道偏离辅助的同时且最大限度的减少人机之间的相互干扰, 以达到最佳的控制效果。执行层执行控制层的转矩和制动力输出, EPS 电机接收到控制信号, 进而在转向柱上施加期望转矩进行辅助转向; 制动系统通过对各个车轮施加不同的制动力使得车辆跟踪期望横摆力矩。

图2 基于可拓联合控制的LDAS

2.1 可拓联合控制器结构设计

根据可拓控制^[18]的基本原理, 为 LDAS 设计了可拓联合控制器。可拓控制器的设计大致分为特征量的选取、关联度计算、可拓控制域划分和确定相应控制算法几部分。选取路面附着系数 μ 和转向盘初始转角 θ_0 作为特征量, 在 μ 较大且 θ_0 较小时, 即在经典域内, 差动制动控制效果较好且无需考虑人

机协调; 当 μ 较小或 θ_0 较大时, 差动制动控制已经无法实现辅助控制, 而采用电动助力转向控制能达到控制要求, 此区域为非域; 在非域和经典域之间为可拓域, 在这一域内, 基于差动制动的辅助控制效果较经典域变差, 可联合 EPS 协同操作以提升辅助控制性能。建立关于特征量的可拓集合空间, 则关于特征状态 $S(\mu, \theta_0)$ 的可拓集合, 如图 3 所示。

图3 可拓集合

在 $\mu-\theta_0$ 平面 X 上, 定义一点 $S_0(\mu_3, 0)$, 记 $D_1 = \sqrt{(\mu_3 - \mu_2)^2 + (\theta_{0,1})^2}$, $D_2 = \sqrt{(\mu_3 - \mu_1)^2 + (\theta_{0,2})^2}$ 。对于任意工况下, 平面上都存在一点 $S(\mu, \theta_0)$, 定义其关联函数

$$K(S) = \begin{cases} 1 - |SS_0| / D_1 & S \subseteq X \\ (D_1 - |SS_0|) / (D_2 - D_1) & S \notin X \end{cases} \quad (11)$$

式中, $|SS_0| = \sqrt{(\mu_3 - \mu)^2 + (\theta_0)^2}$, X 表示经典域。

特征状态关联函数 $K(S)$ 表明了系统特征状态 S 和关于系统特征状态的可拓集合的关联度, 用于不同的可拓集合范围划分, 获得不同可拓域, 具体分以下三种情况。

(1) 经典域: 当状态 S 所得的关联函数值 $K(S) \geq 0$, 对应的特征状态属于经典域。LDAS 处在完全可控的范围内, 系统在该范围内控制性能可达到最优。

(2) 可拓域: 当状态 S 所得的关联函数值 $-1 \leq K(S) < 0$, 对应的特征状态属于可拓域。可拓域是可拓控制研究和解决矛盾问题的关键所在, 而可拓控制主要是在可拓域内发挥作用。

(3) 非域: 当状态 S 所得的关联函数值 $K(S) < -1$, 对应的特征状态属于非域。在此范围内, 特征状态较大的偏离经典域。

2.2 可拓联合控制算法设计

可拓控制根据关联函数划分了对应的经典域、可拓域和非域。为使 LDAS 得到更好的控制性能, 在不同域内采用相应的控制算法, 以获得 LDAS 的可拓联合控制器。

(1) 经典域。在经典域范围内，采用差动制动对车道偏离进行控制。此控制方法既能很好的实现车道偏离辅助，又避免了人机干扰，保证了 LDAS 在此范围内的最佳控制性能。控制器输出 $u(t)$ 记为 $u(DBC)$ 。

(2) 可拓域。可拓域是拓展辅助系统性能的重要区域，控制方法是为了尽可能拓展 LDAS 最佳控制性能的范围。在这一范围内采用基于差动制动和电动助力转向的联合控制策略进行车道偏离辅助，以尽可能拓展车道偏离辅助系统的性能，避免采用单个系统执行时的性能不足。因此，控制器的输出为

$$u(t) = (1 + K(S))u(DBC) - K(S)u(EPS)$$

(3) 非域。当控制器的工作范围处于非域内，此时采用差动制动控制已不能实现车辆的偏离辅助，则采用基于电动助力转向的控制方法单独进行车道偏离辅助。控制器输出 $u(t)$ 记为 $u(EPS)$ 。

综上所述，可拓联合控制器的输出

$$u(t) = \begin{cases} u(DBC) & K(S) \geq 0 \\ (1 + K(S))u(DBC) \\ -K(S)u(EPS) & -1 \leq K(S) < 0 \\ u(EPS) & K(S) < -1 \end{cases} \quad (12)$$

2.3 差动制动系统控制

在如上控制系统框架下，本节进行差动制动系统控制设计。根据侧向驾驶员模型计算出期望转角，并通过参考车辆模型得出期望的横摆角速度，跟踪期望横摆角速度得到所需横摆力矩，并对各个车轮的制动力进行分配，实现差动制动进行车道偏离辅助的目的，如图 4 所示。

图4 差动制动控制结构

2.3.1 神经网络 PID 算法

差动制动控制系统采用 BP 神经网络 PID 控制。基于神经网络的 PID 控制器由经典的 PID 控制器和神经网络两部分构成，如图 5 所示。经典 PID 控制器：直接对被控对象进行闭环控制，控制器的三个参数为在线整定。神经网络：其输出层神经元的输出状态对应 PID 控制器的三个可调参数，通过神经网络的自学习和调整加权系数，使得神经网络的输出对应于某种最优控制律下的 PID 控制参数。

图5 神经网络 PID 控制结构

本文神经网络采用 3-5-3 结构的三层前馈网络。输入层神经元的个数为 3，分别为横摆角速度期望值、实际值和偏差；隐含层神经元个数为 5；输出层神经元个数为 3，即 PID 控制参数。

令输入矢量 $X = (x_1(n), x_2(n), x_3(n))^T$ ， $x_1(n)$, $x_2(n)$, $x_3(n)$ 分别表示 $\omega^*(n)$, $\omega(n)$ 及其偏差 $e(n)$ ；第 k 层的输出用 $y^{(k)}(n)$ ($k=1, 2, 3$) 表示；隐含层神经元的激活函数取正负对称的 Sigmoid 函数

$$f(x) = \tanh x = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}$$

输出层输出分别为

$$y_1^{(3)}(n) = k_p, y_2^{(3)}(n) = k_i, y_3^{(3)}(n) = k_d \quad (13)$$

由于这三个参数不能为负，所以输出层的激活函数

$$\varphi(x) = \frac{1}{2}(1 + \tanh x) = \frac{\exp(x)}{\exp(x) + \exp(-x)}$$

因此，BP 神经网络 PID 控制器的控制律

$$\begin{cases} u(n) = u(n-1) + y_1^{(3)}(n)(e(n) - e(n-1)) + y_2^{(3)}(n) \\ e(n) + y_3^{(3)}(n)(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)) \end{cases} \quad (14)$$

定义性能指标函数

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2}e^2(n)$$

采用 BP 学习算法对网络加权系数进行迭代修正，即按 $\varepsilon(n)$ 对加权系数的负梯度方向搜索调整，并附加一个使搜索快速收敛全局极小的动量项

$$\Delta w_{li}(n) = -\eta \frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w_{li}(n)} + \alpha \Delta w_{li}(n-1) \quad (15)$$

式中， η 为学习率； α 为动量因子； w_{li} 为隐含层和输出层的加权系数。

2.3.2 制动力分配

为了准确控制差动制动，在决定如何分配期望横摆力矩之前，应该考虑每个轮胎的饱和区间。每个轮胎应该满足

$$\sqrt{(F_{xi} + \Delta F_{xi})^2 + (F_{yi} + \Delta F_{yi})^2} \leq \mu F_{zi} \quad (16)$$

式中， μ 为路面附着系数， F_x, F_y, F_z 分别为轮胎的

纵向力、侧向力和垂向力。

要计算允许的制动力, 需要一些假设。LDAS 在速度超过 60 km/h 的时候启动, 此时轮胎的侧偏角保持在 5° 以下。因此, 假设侧向轮胎力是轮胎侧偏角的线性函数

$$F_y = k_{\alpha_f} \alpha_f \quad (17)$$

式中, k_{α_f} 为前轮侧偏刚度, α_f 为轮胎侧偏角。

由于轮胎侧偏角的假设, 则可知最大的轮胎侧向力 $F_{y,\max}$

$$F_{yi} + \Delta F_{yi} \leq F_{yi,\max} = k_{\alpha_f} \alpha_{f,\max} \quad (18)$$

假设垂向轮胎力 F_{zi} 已知, 则可以得到允许的制动力范围

$$\sqrt{(F_{xi} + \Delta F_{xi})^2 + F_{yi,\max}^2} \leq \mu F_{zi} \quad (19)$$

整理得到

$$|\Delta F_{xi}| \leq \sqrt{\mu^2 F_{zi}^2 - F_{yi,\max}^2} - |F_{xi}| = |\Delta F_{xi,\max}| \quad (20)$$

为达到期望的横摆力矩, 所需要的额外差动轮胎纵向力

$$\Delta F_x = 2 |M_b| / l_w \quad (21)$$

式中, l_w 为轮距。

由于差动制动对车辆纵向速度影响不大, 忽略纵向加速度引起的载荷转移, 根据前后轴的垂向载荷可以确定前后轮制动转矩的关系为

$$\begin{aligned} \Delta F_{xr} &= \Delta F_{xf} l_f / l_r \\ \Delta F_{xf} + \Delta F_{xr} &= \Delta F_x \end{aligned} \quad (22)$$

式中, ΔF_{xf} 为目标侧前轮纵向制动力, ΔF_{xr} 为目标侧后轮纵向制动力。

则目标侧前后轮制动压力分别为

$$\begin{aligned} \Delta P_f &= \Delta F_{xf} r / K_f \\ \Delta P_r &= \Delta F_{xr} / K_r \end{aligned} \quad (23)$$

式中, r 为车轮半径; K_f 、 K_r 为由制动摩擦面积、摩擦因数和制动器半径等共同确定的前后车轮制动效能因数。

当 M_b 大于零时, 左侧车轮进行制动, 当 M_b 小于零时, 右侧车轮进行制动。

2.4 电动助力转向系统控制

本文建立的基于电动助力转向的 LDAS 的结构如图 6 所示。通过车路模型获取侧向位置偏差、车速、转向盘转角和横摆角速度等状态参数以及环境信息。计算出车辆转向所需的期望值并结合驾驶员的转矩和车辆位置信息进行人机协调控制。电机执行人机协调控制得到的转矩, 协同驾驶员一起进行

转向。神经网络 PID 控制算法与上一节类似, 此处不再赘述。

图 6 电动助力转向控制结构

3 人机协调控制策略

当 LDAS 启动时, 存在驾驶员和辅助系统共同操纵车辆转向的情况。此时, 需要进行人机协调控制, 以减小驾驶员和辅助系统之间的相互干扰, 提升人机协调控制性能。如图 7 所示, 本文所采用的模糊神经网络控制器充分考虑了驾驶员的转矩和车辆位置信息, 产生一个权重系数 σ , 并通过此权重来动态调整辅助转矩的大小, 实现驾驶员和辅助系统的协调控制。

图 7 人机协调控制系统

设计的用于人机协调的模糊神经网络控制器需要满足以下原则: ① 当驾驶员转矩 $|T_d| > T_d^{\max}$, 此时处于紧急状态, 辅助转矩的权重系数最低, 驾驶员完全占据主权; ② 当 $|T_d| < T_d^0$, 此时驾驶员没有操作转向盘, 辅助系统占据主权, 权重系数 σ 随着侧向偏差 y 的增大而增大; ③ 当 $T_d^0 \leq |T_d| \leq T_d^{\max}$ 且 $|y| < y^{\min}$, 此时车辆处于车道中央, 没有偏离车道的危险, 所以要降低辅助转矩的权重系数, 给驾驶员尽可能多的主权; ④ 当 $T_d^0 \leq |T_d| \leq T_d^{\max}$ 且 $|y| \geq y^{\min}$, 此时分三种情况讨论: 若驾驶员转矩 T_d 和辅助转矩 T_a^* 方向相反, 说明驾驶员误操作, 此时需

要给辅助转矩较大的权重以纠正车辆行驶轨迹；若驾驶员转矩 T_d 和辅助转矩 T_a^* 方向相同，说明驾驶员转向正确。驾驶员转矩越大，辅助转矩的权重就越小，以减小辅助系统对驾驶员的干预；若侧向偏差 y 较大，辅助转矩的权重也较大，反之亦然。

模糊神经网络采用双输入/单输出的五层拓扑结构，即输入层、模糊化层、推理层、归一化层和输出层，如图 8 所示。以驾驶员转矩 T_d 和侧向偏差 y 为输入，权重系数 σ 为输出。设驾驶员输入转矩 T_d 的论域为 $[-8, 8]$ ，模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ；侧向偏差 y 的论域设为 $[-0.6, 0.6]$ ，模糊子集也为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ；输出的权重系数论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $\{Z, S, M, L, VL\}$ 。令输入矢量 $X = (x_1, x_2)^T$ ($x_1 = T_d, x_2 = y$)，第 k 层的输出用 $y^{(k)}$, ($k=1, 2, 3, 4, 5$) 表示，各层功能如下。

第一层：输入层。输入层的每个神经元节点对应一个输入变量 x_i ，这一层的节点直接将输入数据传给第 2 层节点。

$$y_i^{(1)} = x_i \quad i=1, 2 \quad (24)$$

第二层：模糊化层。将输入的连续变量 x_i 的值根据定义的模糊子集上的隶属度函数进行模糊化处理，该层每个节点代表着一个语言变量值，总节点数为 14。第 1 层第 i 个输出对应的第 j 级隶属度计算公式可表示为

$$y_{ij}^{(2)} = \exp\left(-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right) \quad (25)$$

式中， c_{ij} 、 σ_{ij} 分别表示隶属函数的中心和宽度。

第三层：推理层。每个神经元节点代表一条对应的模糊规则，通过匹配第 2 层得到的隶属度，计算出每条规则的适用度。总节点数为 n ($n=49$)，则第 m 个节点的输出为

$$y_m^{(3)} = y_{1j}^{(2)} y_{2j}^{(2)} \quad m=1, 2, \dots, n \quad (26)$$

第四层：归一化层。对网络结构进行总体归一化计算，总节点数为 n 。

$$y_m^{(4)} = \frac{y_m^{(3)}}{\sum_{m=1}^n y_m^{(3)}} \quad (27)$$

第五层：输出层。将模糊化后的变量清晰化，进行反模糊计算。网络输出等于第 4 层各节点输出与其对应权重的乘积和。

$$y^{(5)} = \sum_{m=1}^n w_m y_m^{(4)} \quad (28)$$

式中， w_m 表示第 4 层第 m 个节点与输出节点之间

的连接权值。

图 8 模糊神经网络拓扑结构

4 仿真分析

根据本文设计的可拓联合控制器、人机协调控制器和神经网络 PID 控制器，采用 CarSim/Simulink 搭建仿真模型验证其有效性。

4.1 可拓联合控制策略的仿真分析

本节通过不同的道路附着和转向盘偏离角度的组合，采用 CarSim 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真并分析基于差动制动和电动助力转向的可拓联合控制策略的控制效果，差动制动和电动助力转向的控制器采用神经网络 PID 控制器。设置仿真道路为直路，路宽 3.75 m，车速为 60 km/h，路面附着系数分别设置为低附 0.3、中附 0.5 和高附 0.85，车辆转向盘初始转角分别设置为 10° 、 20° 和 30° ，可拓集合域边界的具体值设为 $\theta_{01}=15^\circ$ ， $\theta_{02}=25^\circ$ ， $\mu_1=0.3$ ， $\mu_2=0.7$ ， $\mu_3=1$ 。

(1) 设路面附着系数为 0.85，转向盘初始偏离角为 10° ，分别对差动制动单独控制、电动助力转向单独控制和可拓联合控制三种控制策略进行仿真。

在此工况下，可拓联合控制器的输出是差动制动控制。由图 9 可以看出，当车辆处于当前工况时，无论采用哪种控制策略都能够使车辆快速稳定的回到车到中心。在车道偏离辅助的过程中，车辆偏离车道中心的最大值都没有超过 1.2 m，说明车辆没有偏离出车道，都达到了控制要求。当采用可拓联合控制时，不仅实现了车辆的偏离辅助，同时也避免了驾驶员和辅助系统之间的协调不一致以及人机冲突，提高了驾驶员的操纵舒适性。

图 9 工况一仿真结果

(2) 设路面附着系数为 0.5, 转向盘初始偏离角为 20° , 分别对三种控制策略进行仿真。

由图 10 可得, 采用差动制动单独控制虽然也能实现车辆的偏离辅助, 但是侧向偏差较大, 达到了 1.8 m, 控制效果不佳; 当采用电动助力转向控制时,

图 10 工况二仿真结果

车辆偏离车道中心的最大距离较小, LDAS 启动工作时间较短, 辅助效果较好。但是电动助力转向单独控制会存在人机的相互干扰; 当采用可拓联合控制时, 其侧向偏差最大值较差动制动单独控制大幅降低, 降幅达到 25%, 横摆角速度较另外两种控制也更为稳定, 较大的提升了差动制动在这一工况下的控制性能, 同时降低了电动助力控制的人机干扰, 系统具有最优的整体控制性能。

(3) 设路面附着系数为 0.3, 转向盘初始偏离角为 30° , 分别对三种控制策略进行仿真。

由图 11 分析可知, 单独采用差动制动控制时, 侧向偏差最大值大于 2.5 m, 横摆角速度过大, 不能快速达到稳定, 此时车辆已经失稳并且完全偏离出车道, 达不到控制要求, 无法实现车道偏离辅助控制。在此工况下, 可拓联合控制器的输出是电动助力转向控制。可拓联合控制时的侧向偏差较差动制动控制降低 35.2%, 虽然需要对驾驶员和辅助系统进行协调控制, 也会存在人机之间的相互影响, 但是在差动制动无法控制的情况下能够较好的实现车道偏离辅助。

图 11 工况三仿真结果

上述仿真结果表明, 可拓联合控制能够满足多种工况下车道偏离辅助的控制要求, 具有很强的适应性和较好的控制性能。可拓联合控制最大程度降低了驾驶员和辅助系统之间的相互影响, 对于减少驾驶员操纵负担、提升汽车横向安全性有积极作用。

4.2 人机协调控制策略的仿真分析

第4.1节在驾驶员不叠加操作的情况下验证了可拓联合控制的优越性, 本节充分考虑驾驶员的输入, 进行人机协调控制策略的仿真分析。设仿真道路为直路, 路宽 3.75 m, 车速恒定为 80 km/h, 在 1.0~1.5 s 施加 10 N·m 的转矩使车辆偏离车道中心, 分别在驾驶员未作出反应、正确操作、误操作和紧急操作四种状态下进行仿真。图 12 分别给出了驾驶员输入转矩、权重系数、辅助转矩和侧向偏差的仿真结果。

情况一: 当车辆即将偏离出车道时, 驾驶员未作出反应。在整个车道偏离辅助过程中, 辅助系统一直占据着控制车辆的主权, 在车辆的侧向偏差较大时, 权重系数保持在一个较高的水平, 当车辆逐渐回到车道中心的时候, 辅助权重也逐渐下降。这一过程中, 车辆的最大侧向偏差为 1.35 m, 未偏离出车道。

情况二: LDAS 启动后, 驾驶员转向正确, 施加给转向盘 5 N·m 的转矩。由于驾驶员的正确介入, 人机协调控制器的输出权重显著减小, 同时辅助转矩也相对较小, 因此减小了辅助系统对驾驶员的干扰, 增大了驾驶员的主权。辅助过程中, 最大侧向偏差为 1.3m, 车辆快速稳定的回到车道中心。

情况三: 车道偏离辅助系统启动后, 驾驶员误操作, 以 5 N·m 的恒定转矩向车道外侧转向。此时, 输出权重较驾驶员未反应时偏大, 辅助系统提供了较大的辅助转矩以抵消驾驶员错误的输入转矩。这一情况下, 车辆的最大侧向偏差虽然增大到 1.47 m, 但是并未偏离车道, 满足人机协调控制要求。

情况四: 紧急情况下, 驾驶员输出 8 N·m 的转矩。在紧急情况下, 控制器的输出权重降到最低, 此刻, 驾驶员占据控制主权, 完全控制车辆转向。

由多种情形下的仿真结果和分析可知, 人机协调控制器可以根据驾驶员的输入和车辆位置信息动态的调整输出权重和辅助转矩, 并很好地实现车道偏离辅助。该方法具有较强的适应性, 对于人机协调不一致和人机冲突能够有效地解决, 有较好的人机协调性能。

图 12 人机协调仿真结果

4.3 神经网络 PID 控制仿真

本文在差动制动控制和电动助力转向控制中均采用了神经网络 PID 控制算法, 为了比较神经网络训练 PID 参数对车道偏离辅助控制系统性能的影响, 本节选择一种典型工况进行仿真。在 Matlab/Simulink 中建立基于差动制动的车道偏离辅助控制模型, 并联合 CarSim 整车模型对 PID 和神经网络 PID 两种控制方法进行联合仿真。设仿真道路为直路, 路宽 3.75 m, 车速为 60 km/h, 路面附着系数 0.85, 车辆转向盘初始转角设置为 10° 。选取神经网络结构为 3-5-3, 学习率 $\eta=0.28$, 动量因子 $\alpha=0.04$, 权重初值区间为 $[-0.5, 0.5]$ 上的随机值。仿真结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出, 当采用神经网络 PID 控制器进行仿真时, 车辆的最大侧向偏差值相比 PID 控制大幅降低, 降幅达到 17%; 车辆在 8 s 时回到车道中央, 较 PID 控制提前 9 s 完成辅助控制; 采用

图 13 神经网络 PID 控制仿真结果

神经网络 PID 控制时车辆横摆角速度的峰值较 PID 控制也明显下降, 降幅约 41%, 横摆角速度的值波动较小, 能更加快速的趋于稳定。由以上分析知, 在 LDAS 中采用神经网络 PID 控制相对于 PID 控制有更好的控制效果, 提升了辅助系统的整体性能。将 BP 神经网络控制策略应用在基于电动助力转向的 LDAS 中也获得了更好的控制效果, 限于篇幅, 不再赘述。

5 硬件在环试验

为了进一步验证所提出的控制策略的有效性, 采用基于 CarSim 车辆模型的仿真环境, 联合 LabVIEW 进行硬件在环试验研究。试验平台和试验框图如图 14、15 所示。

试验台主要由上位机、下位机、接口系统、转向系统以及制动系统几部分组成。在上位机中根据车辆参数建立 CarSim 整车动力学模型和虚拟道路, 联合 CarSim/LabVIEW, 编写 LabVIEW 车道偏离辅助控制程序; 下位机为 NI 的 PXI 系统, 实时运行

图 14 硬件在环试验台架

图 15 硬件在环试验框图

上位机建立的程序; 接口系统是将传感器采集到的转矩和轮缸压力等信号传送到 PXI 系统, 同时将控制信号输出给执行机构的控制器(如控制泵电机和电磁阀的驱动板、控制辅助转矩的 EPS 电机控制器以及生成转向路感的伺服电机)。

5.1 可拓联合控制策略的试验验证

选取典型工况进行台架试验验证, 试验涉及的仿真道路、车速和车辆参数都与仿真时一样。路面附着系数设置为 0.5, 车辆转向盘初始偏转角设置为 20° 。分别对电动助力转向控制、差动制动控制和可拓联合控制三种控制策略进行试验验证。

图 16 试验结果反映出采用可拓联合控制策略时, 车辆没有偏离出车道且能较快回到车道中央。侧向偏差峰值较差动制动控制降低 26%, 横摆角速度相对于两种单独控制也更为平稳, 则可极大地提高了差动制动控制的辅助性能, 同时相对于单独采用电动助力转向系统控制, 联合控制减小了驾驶员和辅助系统之间的干扰。图 17 给出了对应的各车轮轮缸压力值变化曲线, 可拓联合控制所需要的轮缸压力相对较小。表 1 对比了仿真和试验中侧向偏差

及横摆角速度的性能指标，其一致性也验证了可拓联合控制策略的优越性。

(a) 侧向偏差

(b) 横摆角速度

图 16 可拓联合控制策略试验结果

表 1 可拓联合控制仿真与试验结果比较

	侧向偏差 y		横摆角速度 ω	
	峰值/m	偏离时间/s	峰值/(rad/s)	方均根
仿真	1.294 2	8.3	-0.105 4	0.033 2
试验	1.324 0	7.2	-0.098 2	0.039 6

5.2 人机协调控制策略的试验验证

选取两种具有代表性的驾驶员操作方式进行人机协调控制策略的试验验证，即在车辆偏离车道时，驾驶员作出反应，进行误操作和正确操作。试验工况和仿真时相同。

图 18 为试验结果曲线。当驾驶员转向正确时，人机协调控制器的输出权重明显下降，辅助转矩也相对较小，因而给了驾驶员更多的主权，减小了辅助系统对驾驶员的干扰。当驾驶员误操作转向盘时，输出权重保持在较大值，辅助控制器输出较大的转矩以弥补驾驶员施加的错误转矩。从图 17d 可以看出，无论驾驶员在车辆偏离时进行何种操作，LDAS 依然能够保证车辆不偏出车道。表 2 给出了驾驶员误操作工况下人机协调控制策略的仿真和试验结果比较，仿真和试验结果具有相同的趋势，进一步验证了本文所提出的人机协调控制策略的有效性。

(a) 差动制动控制

(b) 可拓联合控制

图 17 试验中各车轮缸压力

(a) 驾驶员输入转矩

(b) 权重系数

图 18 人机协调控制策略试验结果

表 2 人机协调控制仿真与试验结果比较

	侧向偏差 y		辅助转矩 T_a	
	峰值/m	偏离时间/s	峰值/(N·m)	方均根
仿真	1.343 2	7.9	-11.976 1	3.261 4
试验	1.572 4	7.8	-13.005 3	4.328 2

6 结论

(1) 根据路面环境和车辆状态信息,分别建立了车道偏离判断模块、单点预瞄最优曲率驾驶员模型、二自由度参考车辆模型以及制动力分配模块。在此基础上,设计了基于电动助力转向的车道偏离辅助系统和基于差动制动的车道偏离辅助系统。

(2) 针对上述两种辅助系统的不足,设计可拓联合控制器。选取路面附着系数和车辆初始偏转角作为特征量,设计关联函数,划分可拓控制域,并设计相应的控制算法。

(3) 充分考虑驾驶员转矩和车辆位置信息,建立合理的人机协调控制原则,设计模糊神经网络人机协调控制器,通过输出的权重动态调整辅助转矩。

(4) 仿真和试验结果的一致性表明,所设计的可拓联合控制策略和人机协调控制方法充分联合利

用了转向和制动系统,相对于单独采用转向或差动制动系统能够更有效地保证车辆不偏离出车道,具有更好的横向安全性,同时对于降低人机冲突、提升人机协调性能以及提高驾驶员的操纵舒适性都有很好的控制效果。

参 考 文 献

- [1] GAIKWAD V, LOKHANDE S. Lane departure identification for advanced driver assistance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2015, 16(2): 910-918.
- [2] SAITO Y, ITOH M, INAGAKI T. Driver assistance system with a dual control scheme: effectiveness of identifying driver drowsiness and preventing lane departure accidents[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2016, 46(5): 660-671.
- [3] TAN D K, CHEN W W, WANG H B, et al. Shared control for lane departure prevention based on the safe envelope of steering wheel angle[J]. Control Engineering Practice, 2017, 64: 15-26.
- [4] ENACHE N M, NETTO M, MAMMAR S, et al. Driver steering assistance for lane departure avoidance[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(6): 642-651.
- [5] KATZOURAKIS D, ALIREZAEI M, WINTER JC, et al. Shared control for road departure prevention[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics(SMC), October 9-12, 2011, Anchorage, Alaska, USA, 2011: 1037-1043.
- [6] LEE J, CHOI J, YI K, et al. Lane-keeping assistance control algorithm using differential braking to prevent unintended lane departures[J]. Control Engineering Practice, 2014, 23: 1-13.
- [7] MAMMAR S, GLASER S, NETTO M. Time to line crossing for lane departure avoidance: a theoretical study and an experimental setting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 226-241.
- [8] 张海林, 罗禹贡, 江青云, 等. 基于电动助力转向的车道保持系统[J]. 汽车工程, 2013, 35(6): 525-531.
ZHANG Hailin, LUO Yugong, JIANG Qingyun, et al. Lane keeping system based on electric power steering system[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(6): 525-531.
- [9] 于立娇. 基于 EPS 的车道保持辅助控制算法设计与实验验证[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
YU Lijiao. Algorithm design and experimental verification for lane keeping assisted control based on electric power steering[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [10] 吴乙万, 黄智, 刘李盼. 基于差动制动的车道偏离辅助控制[J]. 中国机械工程, 2013, 24(21): 2977-2981.

- Wu Yiwan, Huang Zhi, Liu Lipan. Differential braking control for lane departure avoidance[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(21): 2977-2981.
- [11] 刘剑. 基于差动制动的车道偏离辅助伺服控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- LIU Jian. Research on servo control of lane departure assistance system based on differential braking[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [12] GOODARZI A, GHAJAR M. Integrating lane-keeping system with direct yaw moment control tasks in a novel driver assistance system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2014, 229 (1): 16-38.
- [13] WU J, CHENG S, LIU B H, et al. A Human-Machine-Cooperative-Driving Controller Based on AFS and DYC for Vehicle Dynamic Stability[J]. Energies, 2017, 10(11): 1-18.
- [14] 谈东奎, 陈无畏, 王家恩, 等. 基于人机共享和分层控制的车道偏离辅助系统[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 98-110.
- TAN Dongkui, CHEN Wuwei, WANG Jiaen, et al. Human-machine sharing and hierarchical control based lane departure assistance system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 98-110.
- [15] MERAH A, HARTANI K, DRAOU A. A new shared control for lane keeping and road departure prevention[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 54(1): 86-101.
- [16] 张海林. 基于电动转向的车道保持系统[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- ZHANG Hailin. Lane keeping system based on electric steering[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [17] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- GUO Konghui. Vehicle handling dynamics[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1991.
- [18] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报, 1999, 44(7): 673-682.
- CAI Wen. Extension theory and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(7): 673-682.
-
- 作者简介:** 汪洪波, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为智能汽车动力学及控制, 电动汽车控制技术, 复杂机电系统建模与控制。
E-mail: bob.627@163.com
- 夏志(通信作者), 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为智能汽车辅助驾驶技术。
E-mail: 810528787@qq.com
- 陈无畏, 男, 1951 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制, 发表论文 300 余篇。
E-mail: hfgdcjs@126.com