

基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统设计

袁新¹, 徐燕²

(1. 四川工业科技学院 智能制造与车辆工程学院, 四川 德阳 618500 ;

2. 成都农业科技职业学院 机电信息学院, 成都 611130)

摘要: 在汽车电子转向系统中, 电机和减速齿轮机构中的运动部件 (如轴承、齿轮等) 之间会存在摩擦力和阻尼, 这种摩擦力和阻尼会导致系统响应延迟; 为保证高精度汽车的电子转向精度与安全, 优化设计基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统; 改装扭矩和角位移传感器、执行电机与驱动器和转向自动控制器, 采用滤波电路、电源与元件去耦等方式, 保证硬件元件之间的相对独立, 完成硬件系统的优化; 根据汽车的行驶路况和目标, 确定电子转向目标, 检测高精度汽车实时转角, 通过比对自动计算转向控制量; 利用模糊 PID 技术生成汽车电子转向控制指令, 在控制器下执行控制指令, 降低电机和减速齿轮机构中的摩擦力和阻尼, 实现系统的高精度汽车电子转向自动控制功能; 通过系统测试实验得出结论: 与传统控制系统相比, 优化设计系统的转向角控制误差减小约 0.3° , 同时汽车的行驶安全性明显提升。

关键词: 模糊控制; PID; 高精度控制; 汽车电子转向; 转向控制系统

Design of High-Precision Automotive Electronic Steering Automatic Control System Based on Fuzzy PID

YUAN Xin¹, XU Yan²

(1. College of Smart Manufacturing and Vehicle Engineering, Sichuan Institute of Industrial Technology,

Deyang 618500, China;

2. College of Mechanical and Electrical Information, Chengdu Agricultural College, Chengdu 611130, China)

Abstract: In the electronic steering system of automobiles, there is friction and damping between the moving components (such as bearings, gears, etc.) in the motor and reduction gear mechanism, which can lead to the delay of system response. To ensure the electronic steering accuracy and safety of high-precision vehicles, an optimized high-precision automotive electronic steering automatic control system based on fuzzy PID is proposed. Modify torque and angular displacement sensors, executive motors and drivers, and steering automatic controllers, adopt filtering circuits, power supply, and component decoupling, ensure relative independence between hardware components, and complete the optimization of the hardware system. Based on the driving conditions and targets of the car, determine the electronic steering target, detect high-precision real-time turning angles of the car, and automatically calculate the steering control amount through comparison. The fuzzy PID technology is used to generate automotive electronic steering control commands, execute control commands under the controller, reduce friction and damping in the motor and reduction gear mechanism, and achieve high-precision automotive electronic steering automatic control function of the system. Through system testing experiments, it has been concluded that compared with traditional control systems, the optimized system reduces the steering angle control error by about 0.3° , while significantly improving the driving safety of the vehicle.

Keywords: fuzzy control; PID; high-precision control; automotive electronic steering; steering control system

收稿日期:2024-06-21; 修回日期:2024-08-09。

作者简介:袁新(1987-),男,硕士,副教授。

徐燕(1987-),女,硕士,副教授。

引用格式:袁新,徐燕. 基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 129-136.

0 引言

高精度汽车是一种通过应用先进的传感器、控制系统、地图数据和算法等技术手段,实现汽车的高精度定位、导航、感知和决策等功能的智能化汽车。这些技术使汽车能够更准确地感知周围环境、更精确地控制行驶轨迹、更智能地应对各种驾驶场景,从而提升驾驶安全性、舒适性和效率。电子转向是高精度汽车中的重要组成部分,它通过接收驾驶员的转向指令,由 ECU 控制电动机驱动转向器转动,从而实现汽车的转向^[1-2]。与机械转向系统相比,电子转向系统具有更高的精度和更快的响应速度,能够更好地满足驾驶员的需求。但在电子转向系统控制过程中,电机和减速齿轮机构中摩擦力和阻尼是影响控制效果的重要因素。由于系统在运行过程中会受到多种因素的影响,如温度、湿度及负载等,容易导致摩擦力和阻尼的大小和特性发生变化,以至于不能实现精准控制。为此,需要设计一种高精度汽车电子转向自动控制系统。

为此,国内外相关学者对汽车控制系统进行了深入研究。文献 [3] 提出系统在阿克曼转向原理支持下,针对第三轴线控液压转向系统,建立对应的动力学模型,优化设计指数趋近律的滑模控制器,精准地控制了第三轴转向轮的转角,确保了系统的精确性和稳定性。但该系统主要针对的是多轴车辆,将其应用到其他汽车中会出现控制效果不佳的问题。文献 [4] 设计系统由上部和下部两个控制器协同工作。上部控制器依据阿克曼原理,精准地计算并分配 ERV 四个车轮的转向角。而下部控制器则基于电液分数阶 PID 控制策略,独立控制 ERV 的 4 个车轮进行转动。上述系统以应急救援车作为控制对象,且上下两部分控制器之间存在运行协同问题,为此无法保证汽车能够精准执行电子转向控制操作。文献 [5] 提出系统结合了车辆动力学理论和蒙特卡洛树搜索算法,通过滚动时域转向场直方图法来实现,利用车辆的转向特性来计算预期碰撞时距,并基于这一数据构建了一个风险评估模型,制定了车辆转向控制权的动态分配策略,以确保在实际驾驶中能够精确、安全地执行转向控制操作。上述系统主要针对的是密集障碍环境下的汽车,要求车辆在转向控制过程中不与环境中的其他障碍物发生碰撞,不具有普适性。文献 [6] 深入分析滑模趋近律的设计原理,并据此设计了一种新型滑模趋近律。这种趋近律通过参数调节函数实现趋近速度的动态调整,以适应不同驾驶场景的需求。针对线控转向系统的特点,对滑模控制方式进行了优化改进,以更好地完成转向控制任务。上述系统以新型趋近律作为技术支持,当系统面临外部干扰或模型不确定性时,

新型趋近律可能难以保持稳定的性能,即无法保证控制效果。而文献 [7] 提出系统构建一个独特的车辆模型,考虑左右轮在不对称环境下的性能,将车辆的转向稳定性约束作为后续模型预测控制求解的关键因素之一。在人车共享的结构框架下,设计基于模糊推理的权重分配策略,并据此创建了共享转向模型预测控制器,以实现精确而有效地控制任务执行。上述系统主要以冰雪路面作为控制环境,由于控制场景较为单一,因此无法保证控制系统在汽车转向工作中的控制效果。

为此,设计一种基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统。改装转矩与角度位移传感器、执行器与驱动器以及自动转向控制器,采用滤波电路、电源与元件去耦等方法,确保各硬件元件相对独立,以此对硬件系统进行优化。根据车辆行驶环境及目标,确定电子转向对象,并对车辆实时角度进行高精度检测,自动计算出转向控制量。采用模糊 PID 控制方法,产生汽车电子转向控制指令,实现对电机及减速机构的摩擦力、阻尼的优化,从而实现汽车电子转向的高精度自动控制。

1 高精度汽车电子转向自动控制硬件系统设计

优化设计的高精度汽车电子转向自动控制系统由硬件和软件两个部分组成,硬件部分包括传感器、驱动器、控制器等元件组成,传感器用来检测高精度汽车的实时转向情况,为软件控制功能提供初始数据支持。驱动器为硬件系统中各个元件的工作提供动力支持,而控制器主要用来执行控制任务,为系统软件功能的实现提供硬件支持^[3]。为保证系统的运行效果,同时保证元件与元件之间相互独立、协同运行且互不影响,对多个硬件元件进行改装。

1.1 高精度汽车扭矩传感器和角位移传感器

扭矩传感器用于检测方向盘上扭矩信号的大小和方向,角位移传感器主要用来测量高精度汽车任意时刻的转向角,在转向系统的运作过程中,当扭杆受到扭曲力作用时,会促使输入轴和输出轴的旋转方向产生一定的偏移,传感器内的控制臂会将这一轴向位移转化为相应的旋转角度信号。这一转化过程实现了将扭杆上的扭矩变化转换为与之成比例的电压输出^[4]。最终,这一电压信号被控制组件接收,用以判断转向盘的转动方向以及输入的扭矩大小。高精度汽车扭矩传感器的等效工作电路如图 1 所示。

图 1 中,一路为主输出电压信号,另一路为辅助输出电压信号,当上下两个触点同步地进行向上或向下的移动时,这一动作能够实时反映电阻值的变化。通过这种机制,两个触点的电压值也会相应地发生改变,从而

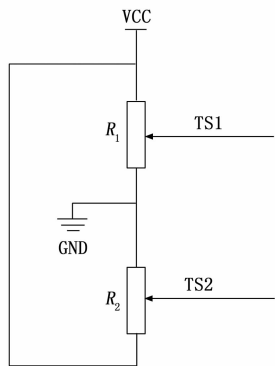


图 1 高精度汽车扭矩传感器等效工作电路图

精确地测量出扭矩的大小和方向。另外, 优化设计的角位移传感器具有双路 PWM 输出, 输出信号采用 55% 占空比 PWM 信号表示 1 800° 旋转角度。

1.2 执行电机与驱动器

执行电机和驱动器是高精度汽车电子转向自动控制系统中的执行机构, 为了实现电机的有效控制, 控制器输出的信号需经过电机驱动电路的处理。在优化设计的控制系统中, 电机需要频繁地进行正反转操作, 这就要求电机具备宽广的调速范围和快速的响应能力^[5]。因此, 选用经过改装的永磁直流有刷电机, 并借助 H 桥技术来调控电机的正反转及速度。电机驱动器包含两大部分: 功率转换电路和控制电路。功率转换电路是核心, 负责将主电源的能量有效地传递给电机, 同时放大控制信号以确保电机获得必要的能量。这一电路的性能直接关系到整个系统的表现。采用了开关型驱动电路, 这种电路的特点是功率器件仅在截止和饱和两种状态下工作。通过调整控制信号的占空比, 改变施加在电机电枢上的平均电压^[6]。占空比越大, 电枢上的平均电压就越高, 进而电流增大, 输出力矩也随之增强。此外, 通过合理选择控制信号的频率, 可以与响应迅速的电机相配合, 实现系统频带的扩展, 并赋予系统快速响应和强大的动态抗干扰能力。

1.3 转向自动控制器

优化设计高精度汽车电子转向自动控制系统中使用的转向自动控制器以模糊 PID 作为技术支持, 改装的转向自动控制器内部组成框架如图 2 所示。

图 2 中, 转向自动控制器以 MC68HC908GZ60 为主控芯片, 该芯片内部集成 10 位 A/D 转换器并具有 PWM 输出功能。选用的主控芯片同时运用该单片机定时器单元可以捕捉到 I/O 引脚上发生的电平跳变时刻, 应用程序算出输入信号的周期和脉宽, 这样就可以方便地测量出车速和发动机转速信号等控制参数的频率, 减少电子转向控制周期^[7]。改装控制器内部使用的 GZ60 总线时钟可通过锁相环技术在外接 32.768 kHz 晶振的

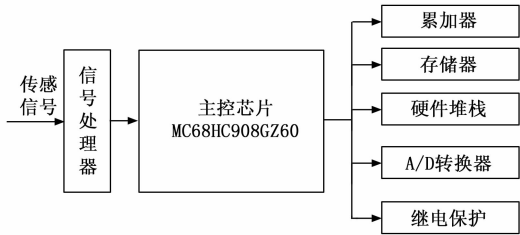


图 2 转向自动控制器内部组成结构图

情况下, 通过软件编程得到最大 8 MHz 的总线时钟频率。除主控芯片外, 优化设计转向自动控制器还对处理器元件和存储元件进行调整, 处理器在执行数据运算和信号处理的任务时, 除了拥有一个 32 位累加器外, 还配备了一个独特的 16 位 X16 位并行乘法器, 它能在一个周期内完成乘法操作, 并且与累加器并行工作, 互不干扰。此外, 专门的移位单元和辅助算术逻辑单元确保了移位和地址运算的高效执行, 几乎不产生额外开销。为了提升中断处理能力, 采用了八级硬件堆栈设计^[8]。大部分指令都是单周期指令, 大大提升了执行效率。在存储方面, 提供了丰富的元件配置。包括片内 32 K 字的 FlashROM, 用于存储程序和数据。此外, 还支持外部扩展, 以满足各种复杂应用的需求。

1.4 系统抗干扰设计

为保证优化设计高精度汽车电子转向自动控制硬件系统中多个硬件设备之间互不影响, 通过引入滤波电路、电源与元件去耦等方式, 保证硬件系统中任意元件的绝对独立^[9]。选用低通滤波电路, 将其引入接入供电电源电路中, 低通滤波电路如图 3 所示。

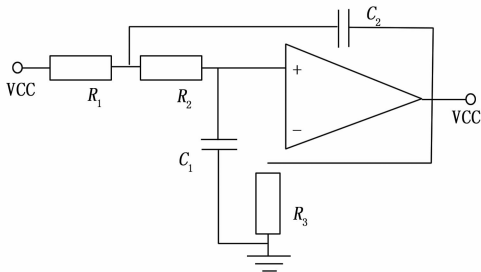


图 3 低通滤波电路图

图 3 中, 电路主要功能是筛选或降低高频信号, 同时传递或增强低频信号。当信号通过该电路时, 高于截止频率的高频信号会被衰减, 而低于截止频率的低频信号则能够顺利通过。在硬件系统的电源或元件端添加去耦电路, 通过负反馈原理和可调电阻来保持输出电压的稳定。

2 高精度汽车电子转向自动控制方法

在高精度汽车电子转向自动控制硬件系统的支持

下,对系统的软件功能进行设计,优化设计系统的基本运行原理为:综合考虑高精度汽车的行驶路况和行驶目标,规划高精度汽车的行驶路线,进而确定汽车的电子转向目标,也就是电子转向自动控制目标。利用硬件系统中的传感器设备,检测任意时刻高精度汽车的实际转角,将其作为电子转向的初始控制数据,通过初始转向角和转向目标的比对,得出任意时刻电子转向控制量的计算结果^[10]。利用模糊 PID 技术通过模糊规则生成、隶属函数选取等步骤,以电子转向控制量为内容,生成汽车电子转向控制指令,在控制器支持下实现系统的电子转向自动控制功能。

2.1 确定高精度汽车电子转向目标

根据高精度的行驶目标,对汽车的行驶路线进行规划,根据驾驶员的目的地和当前位置,算法会筛选出所有可能的行驶路径。接着,算法会评估每条路径的行驶时间、行驶距离和路况状况,在高精度地图的指导下,识别允许行驶的车道,综合考虑行驶时间、行驶距离、路况状况和车道限制等多个因素,为车辆规划出一条最优的行驶路径^[11]。这条路径能够确保车辆在较短时间内到达目的地,同时避免拥堵和车道限制带来的不便。高精度汽车初始规划结果为:

$$L = \frac{(x_e - x_s)(y_e - y_s)}{x_e - x_s} + y_s \quad (1)$$

其中:\$(x_s, y_s)\$ 和 \$(x_e, y_e)\$ 分别为高精度汽车的起始位置和行驶终点位置,在实际高精度汽车行驶过程中,需要考虑实际路况对初始规划的汽车行驶路线进行调整^[12]。根据高精度汽车行驶路线的规划结果,确定行驶路线上任意节点对应的转向角目标。汽车行驶路线与转向角之间的关系如图 4 所示。

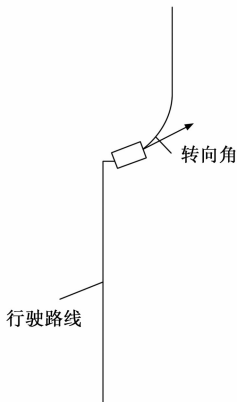


图 4 高精度汽车电子转向角示意图

根据图 4 可以得出任意位置上高精度汽车电子转向角目标的确定结果为:

$$\theta_m(l) = \tan\left(\frac{x(l) - x(l-1)}{y(l) - y(l-1)}\right), l-1, l \in L \quad (2)$$

其中: \$[x(l-1), y(l-1)]\$ 和 \$[x(l), y(l)]\$ 对应的是高精度汽车行驶路线上第 \$l-1\$ 和第 \$l\$ 个节点的位置坐标。按照上述方式可以得出高精度汽车行驶路线上所有节点位置的电子转向目标求解结果,将其作为电子转向的控制目标。通过本小节研究明确了高精度汽车电子转向的目标,即根据驾驶员的目的地和当前位置,结合高精度地图和其他信息,规划出最优的行驶路径,并确定行驶路线上任意节点对应的转向角目标,为整个转向控制系统设定了明确的目标。

2.2 检测高精度汽车实时转角

高精度汽车实时转角检测的目的是确定汽车电子转向的初始值,以此作为初始控制对象。转向角的实际值是通过安装在车辆上的传感器直接测量得到的,利用安装到高精度汽车内部的传感器设备,综合考虑电子转向模块的组成结构和工作原理,基于确定的转向目标,对汽车的实时转角进行直接检测,然后,根据传感器的工作原理和校准后的传感系数,将测量到的原始数据转换为转向角的实际值。高精度汽车的二自由度运动方程可以表示为:

$$\begin{cases} mv_x(\beta + \gamma) = (g_1 + g_2)\beta + \frac{(d_q g_1 - d_h g_2)}{v_x} \gamma - g_1 \vartheta \\ Z\gamma = (d_q g_1 - d_h g_2)\beta + \frac{(d_q^2 g_1 - d_h g_2)}{v_x} \gamma - a g_1 \vartheta \end{cases} \quad (3)$$

式中, \$m\$ 为高精度汽车的自重值, \$\beta\$ 和 \$\vartheta\$ 对应的是质心偏侧角和前轮转角, \$\gamma\$ 和 \$v_x\$ 分别为横摆角速度和高精度车辆行驶速度在水平方向上的分量, \$g_1\$ 和 \$g_2\$ 对应的是前、后轮的侧偏刚度, \$d_q\$ 和 \$d_h\$ 对应的质心到前轴和后轴的距离^[13]。基于公式 (3) 表示的高精度车辆工作机理,确定行驶状态下高精度车辆转向角的实际值,综合考虑扭矩传感器和角位移传感器的工作原理,得出高精度车辆实时转向角的检测结果为:

$$\theta(t) = \kappa_{\text{Sensing}} Z\left(\frac{\beta}{\vartheta}\right) \quad (4)$$

其中: \$\kappa_{\text{Sensing}}\$ 为传感系数,也就是硬件系统中扭矩与角位移传感器设备的工作系数。为保证高精度汽车转角的检测精度,需要对硬件系统中的传感器设备进行校准,并对初始采集的转向角数据进行滤波处理。重复上述采集与处理操作,实现高精度汽车转向角检测结果的实时更新,完成实时转角的检测工作。

2.3 自动计算高精度汽车电子转向控制量

高精度汽车电子转向控制量计算的目的是为系统控制器提供输入值,同时也作为电子转向控制指令的主要内容。基于 2.2 小节提供的车辆状态实时反馈信息,获取高精度汽车电子转向控制量的计算公式如下:

$$\Delta\theta = \theta_m(l) - \theta(t) \quad (5)$$

将高精度汽车转向角的检测结果与转向目标的确定结果代入公式 (5) 中, 即可得出电子转向控制量的计算结果, 并根据 $\Delta\theta$ 的正负属性, 确定高精度汽车电子转向角的控制方向^[14]。除了电子转角外, 高精度汽车的行驶速度也是决定汽车行驶路线走向和电子转向控制效果的因素, 因此需要对高精度汽车的行驶速度进行控制, 对应控制量的计算结果为:

$$\Delta v = \Delta\theta v(t) - v_{\text{age}} \quad (6)$$

式中, v_{age} 为高精度汽车的平均行驶速度, $v(t)$ 为当前时刻汽车行驶速度的检测结果^[15]。将实时行驶参数的检测结果代入到上述公式中进行计算与更新, 即可得出高精度汽车电子转向控制量的自动计算结果。基于汽车电子转向控制量计算结果, 为模糊 PID 控制器的优化提供所必需的输入值。

2.4 基于模糊 PID 技术的控制方法

融合模糊控制和 PID 控制两个部分, 以高精度汽车转向角和速度控制量的计算结果为内容, 生成汽车电子转向的控制指令^[16]。模糊 PID 技术的工作原理如图 5 所示。

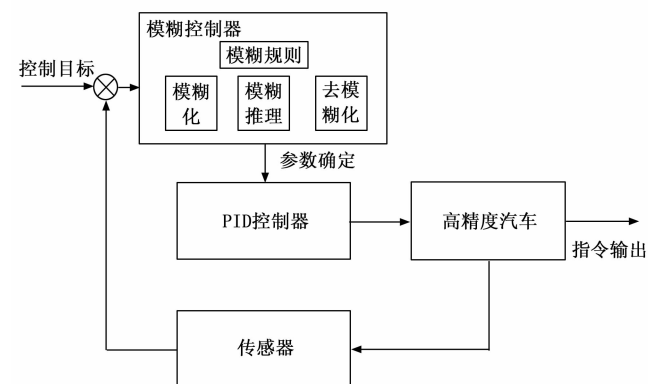


图 5 模糊 PID 技术原理图

根据图 5 所示的控制原理, 在模糊化阶段, 通过映射输入的精确值被转化为模糊控制器能够理解的模糊变量^[17]。模糊化阶段使用的隶属函数为梯形分布, 该函数表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < q_1 \\ \frac{x - q_1}{q_2 - q_1} & q_1 \leq x \leq q_2 \\ \frac{q_4 - x}{q_4 - q_3} & q_3 < x \leq q_4 \\ 0 & x > q_4 \end{cases} \quad (7)$$

其中: q_1 、 q_2 、 q_3 和 q_4 表示的是梯形函数的 4 个转折点。在此基础上, 基于预设的模糊控制规则, 模糊控制器根据输入的模糊变量进行推理, 进而确定 PID 模块中相关工作参数的具体取值, 分别记为 λ_p 、 λ_j 和 λ_w 。PID

模块生成的控制指令为:

$$K_{\text{PID}} = f(x) \lambda_p \left[\frac{1}{\lambda_j} \int \theta(t) dt + \lambda_w \frac{d\theta(t)}{dt} \right] \quad (8)$$

式中, λ_p 、 λ_j 和 λ_w 分别为比例、积分和微分常数。在高精度汽车电子转向的 PID 控制过程中, 在检测到偏差的瞬间, 比例环节能够迅速实施比例控制, 显著提升系统的动态响应速度, 对于系统响应速度具有决定性作用, 并且在发挥其控制作用后能显著降低系统的稳态误差^[18]。然而, 积分环节的增加可能会带来一定的滞后效应, 其主要目的是消除静差、提高系统精度, 但其调节作用在减少静态误差的同时, 也可能导致系统响应速度下降和超调量增加。而且, 微分环节的引入则相当于一个超前控制, 能够预测偏差的未来趋势, 有效抑制超调, 从而预防潜在问题, 优化系统的动态性能。比例、积分、微分三者之间相互协作, 相互平衡, 旨在最大限度地提升控制效果, 并减少彼此之间的误差影响。最终对生成的控制指令进行去模糊化, 也就是将模糊控制器的输出转换为精确数值, 由此可以得出高精度汽车电子转向控制指令的生成结果为:

$$K = \psi_{\text{vague}}^{-1} K_{\text{PID}} \quad (9)$$

其中: ψ_{vague} 为模糊系数。将电子转向角和行驶速度控制量的计算结果代入到上述流程中, 即可得出包含转向角和行驶速度的高精度汽车电子转向控制指令的自动生成结果。

在实际的高精度汽车电子转向自动控制过程中, 以汽车的转向和速度为控制对象, 将生成的控制指令输入到控制器中, 直接作用到高精度汽车的电机、驱动器等执行设备上^[19-20]。在实际的控制执行过程中, 电机和减速齿轮机构都会产生无法消除的各类摩擦力, 因此需要对控制误差进行补偿, 汽车摩擦补偿电流可以表示为:

$$I_b = K_{\kappa_b} R(\theta) \quad (10)$$

其中: κ_b 为汽车电机的内摩擦补偿系数, $R(\theta)$ 为电机作用方向。另外, 还需要在控制过程中执行阻尼补偿和惯性补偿, 最大程度地保证汽车电子转向的自动控制精度。当检测到汽车处于静止状态或汽车行驶数据与控制目标相同时, 即可退出高精度汽车电子转向自动控制程序。

3 系统测试

以测试优化设计系统的控制功能和应用性能为目的, 设计系统测试实验, 系统测试过程中将硬件和软件看作一个整体, 将优化设计控制系统作用到选择的高精度汽车上, 根据实际路况和行驶目标生成多个控制任务, 并确定预期的转向角控制目标。在优化设计系统控制下, 对汽车的实际电子转向数据进行记录, 并与预期控制目标进行比对, 得出反映系统控制功能的测试结

果。系统控制的最终目的是保证汽车可以成功完成转向任务，同时不与道路中的其他车辆发生碰撞，且不会发生侧翻现象，因此从碰撞和侧翻两个方面对系统控制下汽车的行驶风险进行度量，由此得出反映系统应用性能的测试结果。

3.1 选择高精度汽车控制对象

此次实验选择 Tesla Model X 型号的自动驾驶车辆作为控制对象，与普通汽车相比，自动驾驶车辆能够最大程度地降低人为主观因素对系统测试结果产生的误差。选择的 Tesla Model X 车辆是一款中大型 SUV，不仅具有低重心的设计，还配备了先进的自动驾驶技术。该汽车的轴距和轮距分别为 1 800 mm 和 650 mm，汽车总重为 36.7 t，轮胎尺寸为 4.00~12，动力结构为纯电动，转向形式为前轮驱动转向形式。在系统测试实验开始之前，简单对选择高精度汽车控制对象的基本驾驶功能进行调试，保证该汽车能够完成正常的前进、后退、加速、减速等行驶任务，并执行控制器输出的驾驶任务。

3.2 布设高精度汽车行驶路况

控制系统测试时宜选择道路基础设施完善、交通标志和标线清晰、照明充足的道路作为行驶环境，道路基础设施包括道路的平整度、宽度、排水系统以及必要的交通标志和标线，交通标志和标线是引导驾驶员行驶的重要工具，而充足的照明设施可以提高道路的能见度。系统测试尽量规避雨季和雪季，降低因路面湿滑或结冰对实验结果产生的影响。在实验过程中，设置起点至终点总距离 10 km，预计行驶时间 15 min，在该路况中大部分路段为双向四车道，中间设有隔离带，确保了车辆行驶的稳定性与安全性。在行驶过程中，系统检测到路径中一个施工区域导致临时交通管制，为此，系统立即重新规划路径，选择了绕行方案，增加了约 1 km 的行驶距离，但预计只延长了 2 min 的行驶时间。在此基础上，布设多个其他类型车辆作为障碍物，详细记录周围其他车辆在任意时刻的行驶位置和速度，由此完成对汽车行驶路况的布设。

3.3 安装并调试控制硬件系统

根据高精度汽车电子转向自动控制系统优化设计结果，将相关的硬件设备连接到选择的高精度汽车控制对象中。

硬件设备安装完成后，将其调整至运行状态，对其进行调试，以传感器调试为例，采用人为控制的方式形成转向行为，将传感器的实际输出转向角度数据与人为转动角度进行比对，若两者误差低于 ± 0.1 则满足设备的使用要求，否则需要对传感器设备进行重新安装或校对，按照上述方式对硬件系统中的所有设备进行调试与

校准，保证硬件系统中的所有设备均满足运行要求。

3.4 设定模糊 PID 技术运行参数

优化设计的高精度汽车电子转向自动控制系统以模糊 PID 作为技术支持，为保证系统的运行效果，需要对模糊 PID 技术的相关运行参数进行设置，具体的设置情况如图 6 所示。

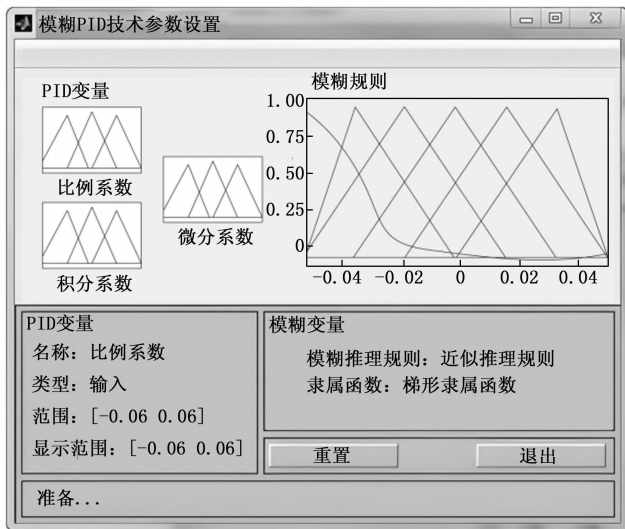


图 6 模糊 PID 技术运行参数设置界面

模糊 PID 技术中比例系数、积分系数和微分系数的初始值分别设置为 0.2、0.1 和 0.01，隶属函数为梯形隶属函数，通过 q_1 、 q_2 、 q_3 和 q_4 参数的确定，从而定义梯形形状，模糊推理规则采用的是近似推理规则，最终将设定的所有技术参数以数值或语句的形式，输入到系统的运行程序中。

3.5 系统测试实验过程

优化设计基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统的软件部分以 CodeWarrior 作为开发环境，在硬件系统支持下，将选择控制对象以及控制任务加入系统的控制程序中，输出任意时刻汽车的电子转向自动控制结果，如图 7 所示。

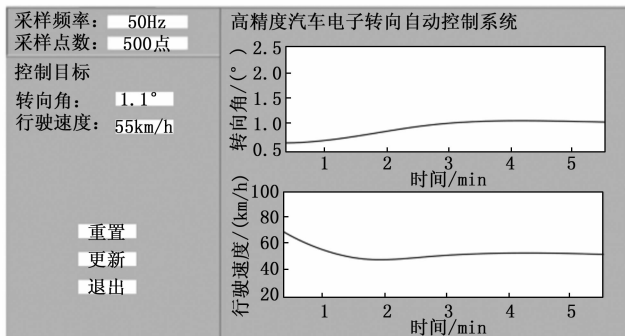


图 7 高精度汽车电子转向自动控制系统运行界面

按照上述方式可以得出汽车行驶过程中高精度汽车

的电子转向自动控制结果。实验设置传统的面向密集障碍规避的人车共享转向控制系统和基于新型趋近律的车辆线控转向滑模控制系统作为对比系统, 在相同的实验环境下完成对比系统的开发, 并作用在汽车控制对象上, 得出相应的转向自动控制结果。

3.6 设置系统测试指标

根据实验目的, 从系统控制功能和控制系统应用性能两个方面设置系统测试指标, 其中系统控制功能的量化测试指标为转向角控制误差, 该指标的测试结果为:

$$\varepsilon = | \theta_{\text{control}} - \theta_m | \tag{11}$$

其中: θ_{control} 和 θ_m 分别为控制系统作用下汽车的实际转向角以及转向角的控制目标, 最终计算得出转向角控制误差越大, 证明对应系统的控制功能越差。另外控制系统应用性能的测试指标为汽车行驶风险系数, 设计系统主要通过计算本车与周围车辆之间的安全距离和速度差评估碰撞风险。当本车与前方车辆的距离小于安全阈值, 或者两车之间的速度差过大, 系统则认为存在较高的碰撞风险。汽车行驶风险系数测试结果如下:

$$\xi = \xi_{\text{collision}} + \xi_{\text{Rollover}} \tag{12}$$

式中, $\xi_{\text{collision}}$ 和 ξ_{Rollover} 分别为控制系统作用下高精度汽车的碰撞风险和侧翻风险, 计算得出汽车行驶风险系数 ξ 取值越大, 证明对应系统的应用性能越低。而在实际的应用过程中, 侧翻风险系数与转向角度或转向误差本身是没有直接关系的, 而是与车辆的整体动态稳定性、车速、转向时的侧向加速度、车辆的悬挂系统、重心高度、轮胎与地面的摩擦力等多个因素综合作用的结果。

3.7 系统测试实验结果与分析

通过记录与统计实验数据, 得出面向密集障碍规避的人车共享转向控制系统下的实际转向角控制系统(文献[5]系统)、基于新型趋近律的车辆线控转向滑模控制系统下的实际转向角控制系统(文献[6]系统)与本文设计系统控制效果的测试结果, 如表 1 所示。

表 1 不同系统的控制效果分析 (°)

实验组别	转向角控制目标	面向密集障碍规避的人车共享转向控制系统下的实际转向角	基于新型趋近律的车辆线控转向滑模控制系统下的实际转向角	基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统下的实际转向角
1	1.1	1.6	1.4	1.0
2	3.2	3.7	3.5	3.2
3	1.9	1.4	1.6	1.9
4	1.6	1.2	1.3	1.5
5	2.0	2.6	2.4	2.1
6	0.7	0.5	0.5	0.7
7	1.4	1.0	1.2	1.2
8	0.8	0.5	0.6	0.8

将表 1 中的数据代入公式(12)中, 得出 3 种系统控制下汽车转向角控制误差的平均值分别为 0.43、0.28 和 0.06°。由测试结果可知, 设计系统的实际转向角与转向角控制目标最接近, 表明该系统的控制效果最好。

基于公式(13), 得出基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统控制性能的测试对比结果, 如图 8 所示。

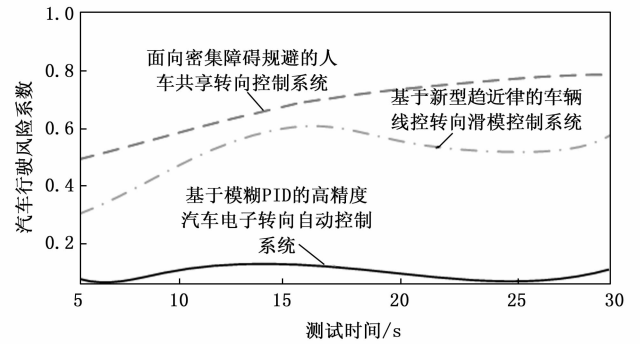


图 8 汽车电子转向自动控制系统应用性能测试对比结果

从图 8 中可以直观地看出, 与两种对比控制系统相比, 应用优化设计控制系统高精度汽车的行驶风险系数明显降低, 即优化设计系统具有更高的应用性能。

4 结束语

高精度汽车电子转向自动控制系统已然成为现代汽车的核心组成部分, 通过精密的传感器、先进的控制算法以及高效的执行机构, 该系统能够实时感知车辆状态、路况信息和驾驶员意图, 从而快速而准确地调整转向系统, 确保车辆稳定、安全地行驶在道路上。在此次研究中, 模糊 PID 控制技术的应用, 不仅提升了系统的自适应性和鲁棒性, 更在减小稳态误差、优化动态响应方面展现出显著优势。基于模糊 PID 的高精度汽车电子转向自动控制系统能够在更多车型和场景中得以应用, 为驾驶者提供更加安全、舒适、便捷的驾驶环境, 推动汽车电子技术的持续进步和发展。

参考文献:

[1] 朱江华, 周文华, 苏晨曦, 等. 基于 AUTOSAR 的电子换挡控制器设计与实现 [J]. 汽车技术, 2022 (7): 48-55.

[2] 王 武, 付小强, 卢青山, 等. 某型火箭炮运弹车自动调平控制系统的设计与实现 [J]. 兵工学报, 2022, 43(s1): 82-87.

[3] 刘 俊, 石朝欢, 林贝清, 等. 多轴车辆线控液压转向系统设计及转角控制 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (14):

1741–1750.

- [4] XU F X, ZHOU C, LIU X H. Hierarchical control strategies for multi-mode steering system of emergency rescue vehicle [J]. *Mechatronics*, 2022 85: 102834–102850.
 - [5] 严 凉, 吴晓东, 胡 川. 面向密集障碍规避的人车共享转向控制系统 [J]. *汽车工程*, 2023, 45 (12): 2222–2233.
 - [6] 黄 华, 高艺鹏, 王伟达, 等. 基于新型趋近律的智能无人车辆线控转向系统滑模控制 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43 (8): 773–782.
 - [7] 谢 波, 高 榕, 许富强, 等. 低附着路况条件下人车共享转向系统稳定控制 [J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2023, 53 (3): 713–725.
 - [8] 石振新, 冯剑波, 王衍学. 基于 ANFIS 及 MPC 的车辆转向换道控制系统设计 [J]. *现代制造工程*, 2022 (2): 70–78.
 - [9] 李 鹰, 张志鹏. 新能源车双电机线控系统的同步转向角控制 [J]. *机床与液压*, 2024, 52 (8): 54–61.
 - [10] 邹梓杰, 严运兵. 转向制动联合的线控转向汽车防侧翻控制研究 [J]. *机械设计与制造*, 2023 (1): 145–149.
 - [11] 邓召文, 易 强, 高 伟, 等. 四轮转向汽车闭环 LQR 控制仿真研究 [J]. *机械设计与制造*, 2022 (1): 20–25.
 - [12] 贺 林, 徐子昂, 黄春荣, 等. 线控转向系统转角预测
- 滑模控制算法研究 [J]. *汽车工程*, 2023, 45 (12): 2200–2208.
- [13] 阎春利, 吴占焯. 基于模糊 PID 的线控转向汽车转向控制研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2023, 45 (7): 54–61.
 - [14] 李剑英, 吴林佳. 基于分数阶理论的汽车电动助力转向系统分析 [J]. *科技通报*, 2023, 39 (5): 63–68.
 - [15] 王启明, 万 璇, 张振东, 等. 基于机器视觉的智能小车转向系统滑模控制 [J]. *上海理工大学学报*, 2023, 45 (6): 645–652.
 - [16] 陈 磊, 王 杨, 董志圣, 等. 一种基于转向意图的车辆敏捷性控制策略 [J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2023, 53 (5): 1257–1263.
 - [17] 赵 歆, 唐 岚. 电动助力转向系统的鲁棒 H_∞ 控制研究 [J]. *机械设计与制造*, 2023 (12): 30–35.
 - [18] 毛营忠, 冯智勇, 郭会茹. 考虑多性能约束的车辆主动前轮转向静态输出反馈控制 [J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56 (2): 156–164.
 - [19] 鲁航宇, 卢剑伟, 魏 恒, 等. 包含时间迟滞的车辆横向主动控制系统动力学稳定性研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52 (10): 1608–1622.
 - [20] 付 翔, 赵熙金, 刘道远. 轮毂电动机驱动滑移转向车辆驱动力控制 [J]. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44 (3): 254–261.
- ment of a smartphone-based lateral-flow imaging system using machine-learning classifiers for detection of *Salmonella* SPP [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2021, 188: 106288.
- [16] DAI Z Q, LI J, CAO Y J, et al. SALSTM: segmented self-attention long short-term memory for long-term forecasting [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2025, 81 (1): 115.
 - [17] 李晓辉, 佟 鑫, 曹敬立, 等. 基于 CEEMD-IBA-LSSVM 的微电网短期负荷预测研究与应用 [J]. *计算机测量与控制*, 2023, 31 (3): 49–55.
 - [18] ATEF S, ELTAWIL A B. Assessment of stacked unidirectional and bidirectional long short-term memory networks for electricity load forecasting [J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 187: 106489.
 - [19] MORADZADEH A, ZAKERI S, SHOARAN M, et al. Short-term load forecasting of microgrid via hybrid support vector regression and long short-term memory algorithms [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (17): 7076.
 - [20] LIU F, LIANG C. Short-term power load forecasting based on AC-BiLSTM model [J]. *Energy Reports*, 2024, 11: 1570–1579.

(上接第 78 页)

- [10] UROŠEVIĆ V. Determining the model for short-term load forecasting using fuzzy logic and ANFIS [J]. *Soft Computing*, 2024: 1–14.
- [11] ABDEL-BASSET M, HAWASH H, SALLAM K, et al. STLNet: two-stream deep network for short-term load forecasting in residential buildings [J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34 (7): 4296–4311.
- [12] SHENG Z, AN Z, WANG H, et al. Residual LSTM based short-term load forecasting [J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 144: 110461.
- [13] YI S, LIU H, CHEN T, et al. A deep LSTM-CNN based on self-attention mechanism with input data reduction for short-term load forecasting [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17 (7): 1538–1552.
- [14] JAVED U, IJAZ K, JAWAD M, et al. A novel short receptive field based dilated causal convolutional network integrated with Bidirectional LSTM for short-term load forecasting [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 205: 117689.
- [15] MIN H J, MINA H A, DEERING A J, et al. Develop-