

基于改进 BP 神经网络的无人驾驶汽车 防抱死制动控制系统设计

曲小纳

(西安思源学院 商学院, 西安 710000)

摘要: 无人驾驶汽车的状态, 如速度、载荷、重心高度等会对制动效果产生影响; 车辆状态信息较多且包含噪声信号干扰, 导致信息采集精度较差, 会导致制动效果不稳定, 甚至出现车轮抱死的情况; 为此, 设计基于改进 BP 神经网络的无人驾驶汽车防抱死制动控制系统; 系统硬件中设计 DSP 处理器, 实现信号的高速处理并生成控制指令, 通过 CAN 实现通讯功能; 设计执行模块执行 DSP 处理器的控制指令; 通过采样模块实现无人驾驶汽车防抱死制动信号的采样; 在软件设计中, 设计引导滤波信号去噪算法, 实施防抱死制动信号的去噪处理, 获取汽车驾驶信息数据; 利用 LM 算法寻找函数值最小的对应参数向量, 获得辨别误差局部最小的权值, 改进 BP 神经网络, 设计基于改进 BP 神经网络的 PID 控制算法, 输出无人驾驶汽车防抱死制动控制 a 指令; 实验结果表明, 紧急制动工况下所提方法的最大超调量为 1.02, 峰值时间为 0.12 s, 调节时间为 0.26 s, 延迟时间为 0.06 s, 上升时间为 0.08 s; 轻微制动工况下所提方法的油路压强为 4.8 MPa。由此证明, 所提方法汽车行驶系统随动性较强。

关键词: DSP 处理器; LM 算法; 改进 BP 神经网络; 无人驾驶汽车; 防抱死制动控制

Design of Anti Lock Braking Control System for Autonomous Vehicles Based on Improved BP Neural Network

QU Xiaona

(School of Business, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710000, China)

Abstract: The status of autonomous vehicles, such as speed, load, center of gravity height, etc., can affect its braking effectiveness. There are many information about vehicle status, including noise interference, which leads to the features of poor accuracy in information acquisition, unstable braking effect, and even wheel lock-up. Therefore, an anti lock braking control system for autonomous vehicles based on improved BP neural network is designed. In the system hardware, design a DSP processor to achieve high-speed signal processing and generate control instructions, and communication function through CAN; Design an execution module to implement the control instruction of the DSP processor; Achieve the sampling of the anti lock braking signal of the autonomous vehicles through the sampling module. In the software design, design a guided filtering signal denoising algorithm to implement denoising processing of the anti lock braking signal and obtain driving information data of the autonomous vehicles; Adopt the Levenberg-Marquard (LM) algorithm to find the parameter vector corresponding to the smallest function value, obtain the weight with the minimum local discrimination error, improve the BP neural network, design a PID control algorithm based on the improved BP neural network, and output the anti lock braking control instructions for autonomous vehicles. Experimental results show that under the emergency braking conditions, the maximum overshoot of the proposed method is 1.02, the peak time is 0.12 s, the regulation time is 0.26 s, the delay time is 0.06 s, and the rise time is 0.08 s; Under the mild braking conditions, the oil pressure of the proposed method is 4.8 MPa. It is proved that the driving system of the proposed method has strong servo performance.

Keywords: DSP processor; LM algorithm; improved BP neural network; autonomous vehicles; anti lock braking control

收稿日期:2023-12-01; 修回日期:2024-01-08。

基金项目:陕西省“十四五”教育科学规划 2022 年度课题(SGH22Y1867);西安思源学院 2023-2024 学年校长基金科研项目重点项目(XASYZD-A2309)。

作者简介:曲小纳(1981-),女,硕士,副教授。

引用格式:曲小纳. 基于改进 BP 神经网络的无人驾驶汽车防抱死制动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2):103-109, 128.

0 引言

作为一种新型交通工具,无人驾驶汽车具有许多优点,例如提高行车安全性、缓解城市交通压力、提升出行便利性等。对于无人驾驶汽车来说,最核心的部分就是控制系统,直接影响着智能车的整体运行效果,其中防抱死制动控制能够使无人驾驶汽车实现紧急制动工况下的行驶能量回收,降低了由于再生制动力矩引发的附着系数低路面上发生车轮抱死情况的概率^[1]。防抱死制动控制系统是一种主动安全技术,其目标是防止车辆在制动过程中出现车轮抱死现象,从而提高车辆在紧急制动情况下的操控性和稳定性。在无人驾驶汽车中,精确的制动控制是实现安全、高效行驶的关键因素^[2]。现有的防抱死制动控制系统主要依赖于复杂的机械和液压系统实现,其反应速度和精度受到多种因素的影响。因此,设计一套能够准确、迅速地控制车辆制动的防抱死制动控制系统,对于无人驾驶汽车的研发和应用具有重要意义。

在防抱死制动控制问题的研究中,目前学者们已经研究出了多种控制策略,包括分层型控制策略、优化分配型控制策略、预测型控制策略等等。其中文献 [3] 提出一种汽车转向防抱死制动控制系统,这是一种由协调级、执行级构成的分层控制系统,仿真结果证实,该系统是有效且稳定的。文献 [4] 提出了基于电磁阀的防抱死制动系统控制策略,测试结果表明,可以满足汽车防抱死制动方面的功能要求。文献 [5] 提出了一种基于线性自抗扰控制的重型多轴特种车辆防抱死制动控制策略,在测试中发现通过该控制策略取得了最佳的制动效果,说明该控制策略在防抱死制动控制系统的应用上是可行的。

然而以上几种控制策略在应用中存在控制不够稳定、主缸压力值上升较慢等多种问题,因此设计一种基于改进 BP 神经网络的无人驾驶汽车防抱死制动控制系统,解决以上问题。

1 无人驾驶汽车防抱死制动控制系统设计

1.1 硬件设计

1.1.1 基于 DSP 处理器的控制模块设计

控制模块由 CAN 单元、DSP 处理器构成。其中通过 DSP 处理器能够实现信号的高速处理并生成控制指令,其设计具体如下:设计一种低功耗、高性能的嵌入式 DSP 处理器,由 4 条总线、两片内存储器、两数据地址产生器、程序控制器组成。其中两片内存储器分别为程序存储器与数据存储器,4 条总线分别为数据存储器数据总线、程序存储器数据总线、数据存储器地址总线以及程序存储器地址总线^[6]。

程序控制器允许各种子程序的调用和跳转,能够实

现复杂的中断服务、零开销循环以及顺序执行指令等功能,其中调用和跳转可以是无条件的,也可以是有条件的。通过程序控制器还能够产生指令地址流,生成控制指令。

程序控制器由 4 部分构成,分别为计数器堆栈与循环计数器、指令地址选择逻辑来源、3 个运算单元以及循环堆栈及循环比较器^[7]。

其中指令地址选择逻辑来源由 4 个部分构成,分别为中断控制器、指令寄存器、PC 堆栈、PC 递增器。当 DSP 处理器正在执行某条指令时,需要通过程序控制器预先取出下一条指令的地址。通过指令地址选择逻辑来源即可产生预取指令的对应存储器地址,并将其送至总线上,用于在存储器中取出下一条指令^[8]。指令地址选择逻辑来源产生的逻辑具体如图 1 所示。

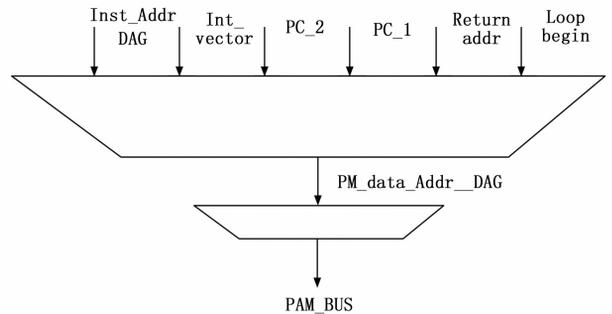


图 1 指令地址选择逻辑来源产生的逻辑

其中 PC 堆栈是一个字长为 24 位、33 个字的自动堆栈,负责在执行调用指令时接收 PC 递增器的输出。在处理中断、执行循环指令时,也需要用到该 PC 堆栈。PC 堆栈接收的 PC 递增器输出不是该递增器的值,是程序计数器的当前值,因此由于中断而无法执行的当前指令,当中断返回后重新被取出执行。在 PC 堆栈的应用中,其弹出与压入都是自动的,也可以使用相关的指令弹出与压入该 PC 堆栈^[9]。PC 递增器负责接收程序计数器的输出,其中选用的程序计数器为一个 24 位的指令寄存器(PC)。选用的 PC 递增器为一个磁性递增数字电位器,通过该电位器能够实现使 PC 的递增加 1。中断控制器选用的是一个 ADI 中断控制器,负责提供下列指定的地址。当 DSP 处理器接收了一个有效的中断后,将转到对应的中断向量地址中实施程序的执行。

计数器堆栈与循环计数器能够提供强大的循环机制。选用的循环计数器与计数器堆栈的技术参数如表 1 所示。

表 1 循环计数器与计数器堆栈的技术参数

项目	循环计数器	计数器堆栈
位数	16 位	16 位
长度	—	8 个字
类型	CNTR 寄存器	—

其中循环计数器在事后能够自动递减，同时可以以预先确定的次数为依据循环控制执行程序流。进入循环以前，需要在循环计数器中加载循环次数^[10]。计数器堆栈负责实现实现循环嵌套，也就是将暂停循环的循环计数器值直接保存至计数堆栈中。

通过循环堆栈及循环比较器能够实现 DSP 处理器的零开销循环。其中循环堆栈由循环结束堆栈和循环开始堆栈组合构成，二者的长度均为 8 个字，并且字长均为 24 位，与计数器堆栈、循环比较器以及指令地址选择逻辑共同构成如图 2 所示的循环控制逻辑。在循环开始堆栈，保存的是循环体首条指令的地址，在循环结束堆栈，保存的是循环体尾条指令的地址。在各周期中，通过循环比较器比较循环体尾条指令地址与指令地址选择逻辑的下条指令地址，当二者相等则完成一次循环执行^[11]。此时循环计数器的值减 1，并将其与 0 比较，在不等于 0 的时候，直接将循环体的首地址当作程序地址，实施新一轮的循环，而当等于 0 的时候，结束循环，继续往下执行程序。

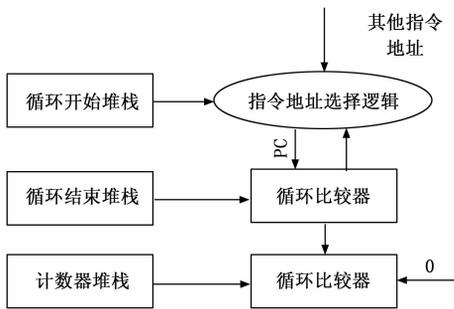


图 2 循环控制逻辑

设置的 3 个运算单元包括移位器、算术逻辑单元以及乘法累加单元。通过这 3 个运算单元与 PID 控制模块，即可根据处理后的信号生成控制指令。其中乘法累加单元具有乘累减、乘累加、乘法这 3 种功能，支持有符号数与无符号数的操作。通过算术逻辑单元能够实现一些标准的逻辑和算术功能，其中逻辑功能包括 XOR、NOT、OR、AND 等，算术功能包括取绝对值、减 1、增 1、取负、减、加。通过移位器可以实现移位功能与和 2 的 n 次幂的乘法运算的高速实现。

选用的 2 个数据地址产生器的差异具体如下：第一个数据地址产生器仅负责产生数据存储地址，而第二个数据地址产生器能够产生程序存储器与数据存储器的地址^[12]。

在 CAN 单元中，通过 CAN 总

线实现 DSP 处理器的 CAN 通讯相关功能，该总线支持 CAN2.0B 协议。

1.1.2 执行模块设计

执行模块由驱动电路、三相逆变器、电动机以及执行机构构成，能够面向无人驾驶汽车防抱死制动系统执行 DSP 处理器的控制指令。其中驱动电路的设计具体如下：在驱动电路中，设置一个 H 桥电路，该电路利用 PWM 输入实现电动机正反转的控制，达到节能作用。分别将 H 桥电路的两端接入两个电机中。其中 PWM 输入来自 PWM 信号波产生电路。

三相逆变器的设计具体如下：设计一种低压大电流三相逆变器，与电动机一起为执行机构提供动力。该三相逆变器由驱动电路模块、控制模块、信号采样调理模块、辅助供电模块、主功率电路模块构成。

其中驱动电路模块负责向功率 MOSFET 栅极传递控制模块的控制信号，以及控制功率 MOSFET 器件的关断或开通。为提升驱动电路可靠性同时简化设计，采用可靠稳定的驱动芯片而非应用分立器件搭建驱动电路。在主功率电路中，由于 MOSFET 为多个并联状态，想要同时驱动这些 MOSFET，需要提供充足的驱动功率。因此，采取多个驱动芯片并联的设计方案，增强模块的驱动力^[13]。在电路设计中，每一个 MOSFET 器件到驱动电路的线路需要保持等长，以确保并联 MOSFET 导通的一致性。

控制模块由主控芯片与芯片外围电路组成，以主控芯片为核心，其电路设计如图 3 所示。

控制模块负责控制逆变器各桥臂的关断与开通，以控制电动机的转速与输出转矩。其中主控芯片 88SS9187 负责处理采集信号并对其进行数据处理，从而发出控制指令。通过 88SS9187 能够实现电流内环与电压外环的双闭环控制，从而更加迅速、精确地完成调节，在保持三相逆变器较快反应速度的同时，还能够减小超调。由于该三相逆变器面对的是电动机的控制场景，因此将主控芯片调制方式定为 SVPWM。88SS9187

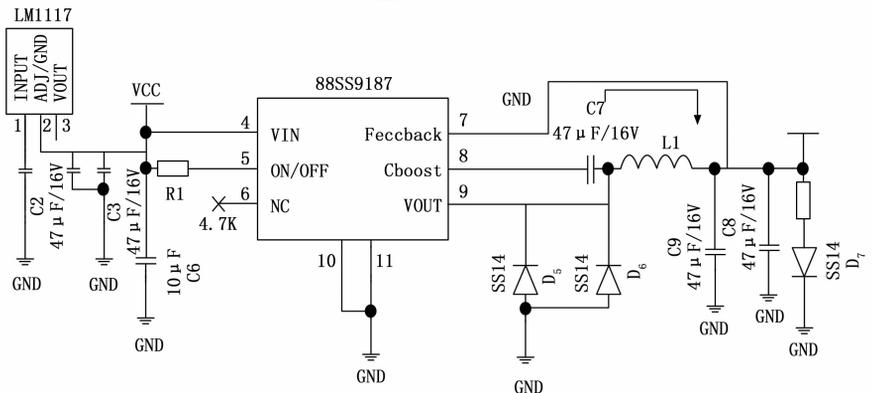


图 3 控制模块的电路设计

具备很大的存储容量与较高的运算速度，能够留出存储资源与计算资源裕度。

信号采样调理模块由调理电路与传感器构成，通过传感器采集转子位置、电动机电流等信号，并利用调理电路实施采集信号的转换，使主控芯片能够识别^[14]。

在辅助供电模块中，通过 DC-DC 转换器将蓄电池的电压转换为合适的电压值，向其他电路供电。出于安全方面的考虑，对各电路的供电需要实施电气隔离。

主功率模块由直流母线电容、电容软起动电路以及逆变桥构成，负责驱动电动机转动。选用的逆变桥为两电平三相逆变器拓扑。组合不同容值的电容阵列构成直流母线电容，通过电容软起动电路减小脉冲电流对于直流母线电容造成的破坏。

在执行机构的设计中，所设计的执行机构需要依据控制指令对制动踏板实施控制。设计的执行机构由拉绳及绕线器、减速器等构成，具体如图 4 所示。

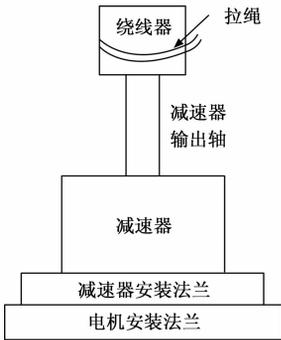


图 4 设计的执行机构

选用的减速器为一种斜齿高精度减速器，负责传递动力，将其加装于电动机上，选用的电动机为无刷直流电机。通过减速器增大无刷直流电机的转矩，降低其转速，以更好地适应设计要求。

选择的拉绳为尼龙材质的拉绳，使拉绳回收时能够良好地缠绕在绕线器上。选择绕线器时，其内孔直径与需要与减速器输出轴相匹配。

该执行机构由于采用了软连接方式，具有输出力大、尺寸小等优点。

其中无刷直流电机的固定方式具体如下：通过钢板与螺栓固定无刷直流电机。具体来说，在防抱死制动踏板下方固定 3 块钢板，将无刷直流电机放入 3 块钢板围成的空间中，利用螺栓来固定^[15]。

采用抱紧的方式固定减速器与电机。通过销件同心实现绕线器与减速器输出轴的固定。

1.1.3 采样模块设计

采样模块由电流采样电路与 I/V 转换电路构成。其中电流采样电路的设计具体如下：在该电路中，通过压力传感器实现电流信号的采样与反馈，获取电动

机的电流信号。并利用调节电阻实施最大电流值的调节。

压力传感器选用液压传感器，设计一种由陶瓷膜片、全动态电桥、差分归一化放大器以及非线性校正环路构成的液压传感器。其中全动态电桥是由压缩区与拉伸区中分别设置的 2 对应变片连接构成的，通过直流电源对其进行供电，以降低环境温度对于电路造成的影响。

当制动管路内的油液流经该液压传感器时，油液的流体压力作用会作用在传感器的陶瓷膜片上，使其两侧存在压差，此时全动态电桥的桥臂阻值会发生变化，从而带来输出电压的变化。利用差分归一化放大器实施电压信号的转换后，完成电流信号的采样。采样后的电流信号会经过非线性校正环路，将输出电流变为 4~20 mA 范围内的标准信号。

I/V 转换电路的设计具体如图 5 所示。

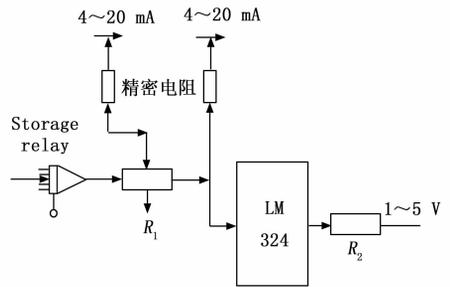


图 5 I/V 转换电路的设计

通过 I/V 转换电路能够放大传感器输入电流，同时可以将电流转换为 DSP 处理器能够捕捉的电压^[16]。将其电路引脚与 DSP 处理器的电路引脚相连。

1.2 软件设计

1.2.1 车辆采集信号去噪

由于车辆状态信息包含噪声信号干扰，会影响制动的稳定性，为此设计一种引导滤波信号去噪算法，实施采样信号的去噪处理。用 $\bar{\omega}_i$ 表示输出信号，用 ϑ_i 表示引导信号。则在窗口 τ_k 中二者是存在以下线性关系的：

$$\bar{\omega}_i = \alpha_k \vartheta_i + \beta_k, i \in \tau_k \quad (1)$$

式中， α_k 为车辆速度， β_k 为横摆角速度。

根据 (1) 式，可以用下式表示 $\bar{\omega}_i$ 的梯度：

$$\nabla \bar{\omega}_i = \bar{\omega}_i \nabla \vartheta_i \quad (2)$$

式中， $\nabla \vartheta_i$ 为引导信号的梯度。

为获取车辆速度 α_k 、横摆角速度 β_k 的准确数据，在窗口 τ_k 中将代价函数定义为下式：

$$C(\alpha_k, \beta_k) = \sum_{i \in \tau_k} [(\nabla \bar{\omega}_i - \bar{\omega}_i)^2 + \rho^2] \quad (3)$$

式中， ρ 为调整参数，是为防止 α_k 过大而设定的。

根据线性回归分获取线性系数 α_k 、 β_k 的最优解，具体表示如下式：

$$\begin{cases} \alpha_k = \frac{C(\alpha_k, \beta_k)}{\nu_k^2 + \rho} \\ \beta_k = \frac{C(\alpha_k, \beta_k)}{\alpha_k r_k} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ν_k 为窗口 τ_k 内引导信号的方差, r_k 为窗口 τ_k 内引导信号的均值。

最终可以将输出信号表示为下式:

$$\bar{\omega}_i = (\bar{\alpha}_k \vartheta_i + \bar{\beta}_k) \quad (5)$$

式中, $\bar{\alpha}_k$ 、 $\bar{\beta}_k$ 分别为全部窗口内 α_k 、 β_k 的均值。

通过该算法完成采样信号的去噪处理, 获取更为准确的车辆速度及横摆角速度信息。

1.2.2 基于改进 BP 神经网络的 PID 控制算法

对车辆采集到的信号去噪, 能够最大程度地减少外界环境对车辆信息采集过程中的噪声干扰, 将使系统的鲁棒性大大提高, 即使在某些不利条件下, 例如路面湿滑、载荷突变等, 也能保证制动控制的稳定性和可靠性。对于无人驾驶汽车防抱死制动控制这类复杂的非线性系统, 传统的 PID 控制器可能无法达到理想的控制效果。因此, 设计一种基于改进 BP 神经网络的 PID 控制算法, 配合 DSP 处理器实现无人驾驶汽车防抱死制动控制。

BP 神经网络容易学习时间过长, 同时该网络在收敛过程中还容易陷入局部极小值。针对以上问题, 通过 Levenberg-Marquard 算法对其进行改进。LM 算法是一种用于寻找能够使函数值最小的对应参数向量的函数。

具体改进如下: 在传统算法中, 仅以一阶信息为依据实施权值调整, 因此收敛速度较慢。现以权值误差的二阶信息与一阶信息为依据实施权值调整。同时在调整权值时辨别误差的局部最小, 改善 BP 神经网络的缺陷。

此时在权值调整过程中, 面临着两 LM 算法收敛至最小值时, 可能发生发散和振荡的问题, 采用以下方式减缓发散和振荡趋势^[17]。

通过低通滤波器实施算法结果轨迹的过滤, 使发散和振荡得到平滑^[18]。应用如下式的低通滤波器:

$$x(l) = \chi x(l-1) + (1-\chi)\delta(l) \quad (6)$$

式中, χ 为设置的动量系数, $x(l-1)$ 为上一时刻的输出, $\delta(l)$ 为输入, $x(l)$ 为输出。

根据该低通滤波器将 LM 算法中权值的公式调整为下式:

$$\Delta p_l = -(1-\chi) \{ \mathbf{H}^T[x(l)] \mathbf{H}[x(l)] + \epsilon_l G \}^{-1} \mathbf{H}^T[x(l)] E(p_l) + \chi \Delta p_{l-1} \quad (7)$$

式中, Δp_{l-1} 为动量项, \mathbf{H}^T 为梯度矩阵, \mathbf{H} 为梯度分量矩阵, ϵ_l 为引入的固定参数, G 为可逆参数, $E(p_l)$ 代表误差函数。

基于改进后的 LM-BP 神经网络实现 PID 控制, 设计的 PID 控制器结构如图 6 所示。

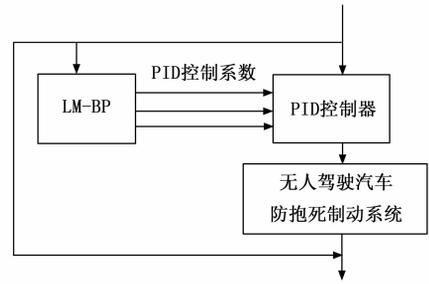


图 6 设计的 PID 控制器结构框图

基于 PID 控制器实现无人驾驶汽车防抱死制动控制的运行步骤流程如下:

1) 初始化网络参数: 在开始防抱死制动控制之前, 需要先设定 PID 控制器的参数, 包括比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 3 个参数, 以及学习速率等其他参数。这些参数的初始值可根据经验或实验数据给定, 也可随机生成。

2) 迭代学习: 开始迭代学习过程, 首先进行一次完整的制动过程模拟或实验, 将期望的制动效果 (期望输出) ϵ'_l 与实际制动效果 (网络输出) ϵ_l 进行比较, 计算两者之间的误差 (采样误差):

$$\delta = |\epsilon'_l - 2\epsilon_l| \quad (8)$$

式中, φ 为修正系数, 其计算公式具体如下:

$$\varphi = \text{sgn} [|E(p_l)| - |E(p_{l-1})|] \quad (9)$$

3) 计算控制输出: 根据改进后的 LM-BP 神经网络结构和当前的网络权值, 计算各层的输出与输入, 注意最终的神经网络输出应为 3 个 PID 控制系数的组合。

无人驾驶汽车防抱死制动控制的控制输出结果具体如下:

$$\Delta p'_l = -\bar{\omega}_i \delta \{ \mathbf{H}^T[x(l)] \mathbf{H}[x(l)] + \epsilon'_l G \}^{-1} \chi \Delta p_l \quad (10)$$

4) 控制实施: 根据 3 个 PID 控制系数的计算结果, 实施对无人驾驶汽车的制动控制。

5) 调整网络参数: 根据权重调整公式, 对网络权值进行调整, 以减小采样误差, 实现 PID 控制参数的自适应调整。然后迭代次数加一, 返回步骤 2) 继续进行下一轮的学习和调整, 直到达到预设的最高迭代步数^[19], 实现无人驾驶汽车防抱死制动控制^[20]。

将基于改进后的 LM-BP 神经网络的 PID 控制应用在无人驾驶汽车防抱死制动控制中, 由于神经网络能够逼近任何连续函数, 因此该方法可以使 PID 控制器的参数更加精确地适应无人驾驶汽车防抱死制动系统的实际需求。

2 实验测试

2.1 实验环境

在实验测试中, 建立一个适合于无人驾驶汽车防抱死制动控制系统的测试环境, 该环境包括车速、方

向盘转角和刹车踏板压力作为输入参数，以及刹车压力作为输出参数，并使用改进 BP 神经网络进行训练，并评估了系统在不同工况下的性能。使用 Python 编程语言和 TensorFlow 框架构建和训练神经网络。实验过程遵循标准化的数据预处理、模型训练和评估流程，确保了实验结果的准确性和可靠性。具体参数如表 2 所示。

表 2 实验参数及取值

参数		取值
输入参数	车速	60~120 km/h
	方向盘转角	-30~+30°
	刹车踏板压力	5 000 Pa
输出参数	刹车压力	5 000 Pa
神经网络结构	神经元	100
	卷积核	3×3
	池化步长	2
	通道数	64
神经网络训练	学习率衰减因子	0.95
	Dropout 率	0.2
	批量大小	64
	动量参数	0.9
	初始化权重	0.01
	L1 正则化	0.001

2.2 实验工况

对于设计的基于改进 BP 神经网络的无人驾驶汽车防抱死制动控制系统，利用其在两种工况下对无人驾驶汽车实施防抱死制动控制。实验无人驾驶汽车制动主缸最大压力值是 6 MPa，即限定斜坡响应信号阈值是 6 MPa。

1) 紧急制动工况。汽车行驶于较为复杂的交通环境中时，会遇到突发状况，此时车辆需要紧急制动。而无人驾驶汽车的行驶中会遇到更加多样化的突发状况，如车载电子计算机突然断电、程序出错、前方路况很难识别、前方突然出现障碍物或人等，此时都需要紧急制动，当制动不够及时，可能会发生严重后果。因此对于紧急制动工况的制动控制是很有必要的。

2) 轻微制动工况。在道路上，当无人驾驶汽车正常行驶时，前方会遇到行人或者车辆，此时无人驾驶汽车需要平稳制动从而停车或改变方向。以及当车辆需要停在指定位置时，或车辆速度过高时需要进行轻微制动，使汽车能够平稳减速。因此对于轻微制动工况的制动控制也是必不可少。

2.3 实验过程

首先利用系统的采样模块实施两种工况下的信号采样。对于采样获取的信号，利用信号去噪模块对其实施信号去噪处理。在信号去噪处理中，窗口 τ_k 的半径与调整参数 ρ 的取值决定着引导滤波器的增强信噪比效

果，因此需要通过实验来决定。

为获取最优的引导滤波器参数，对窗口 τ_k 的半径与调整参数 ρ 不同取值下两种信号的滤波器处理结果实施分析，选择使采集信号信噪比最高的对应参数作为最终的滤波器参数对采集的实验信号实施处理。

其中紧急制动工况下的滤波实验结果如表 3 所示。

表 3 紧急制动工况下的滤波实验结果

项目	τ_k 的半径为 2	τ_k 的半径为 3	τ_k 的半径为 4
$\rho=0.04$	5.236 9	4.652 8	3.268 4
$\rho=0.06$	5.236 7	4.652 8	3.268 3
$\rho=0.08$	5.236 4	4.652 8	3.268 3
$\rho=0.10$	5.236 0	4.652 8	3.268 3

根据表 3 可知，当 τ_k 的半径为 2， ρ 的值为 0.04 时，滤波信噪比最高。

轻微制动工况下的滤波实验结果如表 4 所示。

表 4 轻微制动工况下的滤波实验结果

项目	τ_k 的半径为 2	τ_k 的半径为 3	τ_k 的半径为 4
$\rho=0.04$	5.563 5	4.862 2	6.554 4
$\rho=0.06$	5.563 0	4.862 2	6.554 2
$\rho=0.08$	5.562 7	4.862 2	6.554 0
$\rho=0.10$	5.562 5	4.862 2	6.554 0

根据表 4 可知，当 τ_k 的半径为 4， ρ 的值为 0.04 时，滤波信噪比最高。

接着结合控制模块与基于改进 BP 神经网络的 PID 控制模块获取两种工况下的实验无人驾驶汽车防抱死制动控制指令。

其中，基于改进后的 LM-BP 神经网络实现 PID 控制时，将 BP 神经网络结构设定为 3 层以充分利用其泛化能力。由于网络输出的是 3 个 PID 参数，因此将输出层神经元的数量定为 3 个。将偏置值固定为 1，作为一个输入，因此输入层神经元数量为 2 个。并通过实验确定隐含层神经元数目，发现当数量为 5 个时能够达到最佳效果，因此将隐含层神经元数目定为 5 个。

采用 S 形函数作为隐含层的激活函数，采用非负激活函数作为输出层的激活函数，并将网络初始权值定为 0.001。

最后通过执行模块执行控制指令，完成实验无人驾驶汽车防抱死制动控制。

2.4 测试结果

对于第一种工况下设计系统动态性能的分析，选择动态性能指标进行评价。阶跃函数下可以用于评价的动态性能指标有容许误差、稳态误差、峰值时间、调节时间、延迟时间、上升时间、最大超调量等等。现选择通过输入阶跃响应信号实施测试系统动态性能的测试，将评价指标定为最大超调量、峰值时间、调节时间、延迟

时间、上升时间。

在测试中，将文献 [3] 提出的汽车转向防抱死制动控制系统、文献 [4] 提出的基于电磁阀的防抱死制动系统控制策略与文献 [5] 提出的基于线性自抗扰控制的防抱死制动控制策略作为对比方法，实施对比测试，并分别用方法 1、方法 2、方法 3 来表示。

设计系统与 3 种对比测试方法的最大超调量、峰值时间、调节时间、延迟时间、上升时间对比测试结果如表 5 所示。

表 5 对比测试结果

动态性能评价指标	设计系统	方法 1	方法 2	方法 3
最大超调量	1.02	1.56	1.62	1.34
峰值时间/s	0.12	0.26	0.16	0.18
调节时间/s	0.26	0.38	0.32	0.31
延迟时间/s	0.06	0.08	0.10	0.08
上升时间/s	0.08	0.10	0.12	0.11

根据表 5 得知，设计系统的最大超调量为 1.02，在几种测试方法中最低，说明设计系统控制下是最稳定的。设计系统的峰值时间为 0.12 s，在几种测试方法中最低，说明在设计系统的控制下，实验无人驾驶汽车很快即可达到最大制动力。设计系统的调节时间最短，为 0.26 s，说明设计系统控制下比较稳定。设计系统的延迟时间最短，为 0.06 s，说明在设计系统的控制下反应最为迅速。设计系统的上升时间也是最短的，为 0.08 s，说明在设计系统的控制下主缸压力值上升最快。

在第二种工况下，对于设计系统动态性能的分析，选择系统随动性作为评价指标。同样将方法 1、方法 2、方法 3 作为对比方法实施对比测试，测试项目为斜坡响应下实验无人驾驶汽车预期油压和几种实验方法下的实际油压。

对比测试结果如图 7 所示。

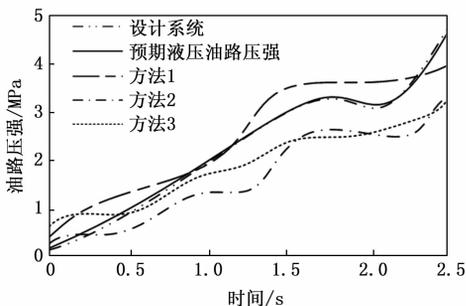


图 7 对比测试结果

根据图 7 得知，在第二种工况下，设计系统控制下实际液压油路压强与预期液压油路压强最贴近，即设计系统的系统随动性最强。

3 结束语

无人驾驶汽车是解决交通安全与交通拥挤等问题的一个重要手段，而其防抱死制动控制是整个研究领域中的重要构成部分。在研究中设计了一种基于改进 BP 神经网络的无人驾驶汽车防抱死制动控制系统，通过控制模块、执行模块、采样模块执行 DSP 处理器的控制指令，实现无人驾驶汽车防抱死制动信号的高速处理。基于 LM 算法改进 BP 神经网络，以权值误差的二阶信息与一阶信息为依据实施权值调整，配合 DSP 处理器实现防抱死制动控制。但是，受到研究条件与时间等方面的限制，尽管取得了一定研究成果，但在研究结果中仍存在很多不足，有待进一步的研究，如执行机构灵活性不足等，今后将专注于对研究成果进行优化并反复进行测试。

参考文献：

- [1] 刘 斌, 施 卫, 常嘉伟, 等. 纯电动智能汽车制动防抱死系统控制逻辑研究 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (1): 100-104.
- [2] 苑 磊, 何 仁. 泰勒级数前馈迟滞补偿电液复合 ABS 滑移率控制 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44 (1): 29-36.
- [3] 李 果, 刘华伟. 汽车转向防抱死制动控制系统研究 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (11): 218-223.
- [4] 刘天洋, 余卓平, 熊 璐, 等. 集成式电子液压制动系统防抱死制动控制 [J]. 汽车工程, 2017, 39 (7): 767-774.
- [5] 程洪杰, 何星磊, 刘志浩, 等. 基于线性自抗扰控制的重型多轴特种车辆防抱死制动控制研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (1): 249-258.
- [6] 邱明明, 曹龙凯, 黄 康, 等. 基于视觉识别的线控制动压力滑模控制 [J]. 汽车工程, 2021, 43 (1): 68-76.
- [7] 李寿涛, 孙鹏鹏, 魏玉博, 等. 四轮轮毂电动汽车的紧急制动能效性转矩优化 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2022, 43 (10): 1391-1396.
- [8] 刘永涛, 刘传攀, 刘湘安, 等. 基于自适应采样时间 MPC 的自动紧急制动系统 [J]. 汽车工程, 2023, 45 (1): 32-41.
- [9] 刘晓辉, 于良耀, 郑 晟, 等. 基于电子助力器的冗余防抱死制动算法研究 [J]. 汽车工程, 2022, 44 (1): 82-93.
- [10] 李 超, 张 进. 一种用于电液防抱死制动系统的显式非线性模型预测控制器设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (4): 116-119.
- [11] 朱 冰, 党瑞捷, 赵 健, 等. 智能汽车冗余电控制动系统电流传感器故障容错控制 [J]. 中国公路学报, 2023, 36 (4): 249-260.

(下转第 128 页)