

张劭栋, 刘铮. 基于自适应 PID 的刹车踏板模拟器直流伺服电机控制系统[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(1): 50-58.  
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24032804

# 基于自适应 PID 的刹车踏板模拟器直流伺服电机控制系统

张劭栋, 刘铮

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 为了能够精准控制刹车踏板感曲线, 本文设计了一款基于伺服电机力反馈控制的刹车踏板模拟器, 当踏板受到压力时, 控制器将通过踏板上的压力传感器采集到压力值, 并根据刹车踏板感曲线确定踏板期望行程值, 通过控制伺服电机的位置环和速度环来使踏板运动相应行程。由于传统 PID 控制算法控制精度低且无法满足 PID 参数实时变化的需要, 本文采用模糊自适应 PID 控制算法、基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制算法、基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法对直流伺服电机控制系统的位置环 PID 参数进行自动寻优, 并通过搭建直流电机系统仿真模型来对比这 3 种算法对系统的优化控制效果。研究表明, 这 3 种自适应 PID 控制算法都能提高系统的控制精度, 并能够在较短的时间内对位置进行高效跟踪; 其中基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法控制效果最佳, 不仅响应速度最快, 而且在系统受到干扰时恢复稳定的速度最快。

**关键词:** 刹车踏板模拟器; 直流伺服电机系统; 自适应 PID 控制; 模糊控制; BP 神经网络; 遗传优化算法

中图分类号: TP273.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)01-0050-09

## Adaptive PID-based DC servo motor control system for brake pedal simulator

ZHANG Jiedong, LIU Zheng

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to accurately control the brake pedal sense curve, this paper designs a brake pedal simulator based on servo motor force feedback control, when the pedal is under pressure, the controller will collect the pressure value through the pressure sensor on the pedal, and determine the desired travel value of the pedal according to the brake pedal sense curve, and then make the pedal move the corresponding travel by controlling the position loop and speed loop of the servo motor. Due to the low control accuracy of the traditional PID control algorithm and the inability to meet the needs of real-time changes in PID parameters, this paper adopts the fuzzy adaptive PID control algorithm, BP neural network-based adaptive PID control algorithm, the adaptive PID control algorithm based on genetic optimisation algorithm for DC servo motor control system of the position loop PID parameters of the automatic search for excellence, and through the construction of DC motor system simulation model to compare the optimal control effect of these three algorithms on the system. The results show that all three adaptive PID control algorithms can improve the control accuracy of the system and track the position efficiently in a shorter time; among them, the adaptive PID control algorithm based on the genetic optimisation algorithm has the best control effect, which not only has the fastest response speed, but also restores the stability of the system when it is subjected to disturbances at the fastest speed.

**Key words:** brake pedal simulator; DC servo motor system; adaptive PID control; fuzzy control; BP neural network; genetic optimization algorithm

## 0 引言

随着新能源汽车技术逐渐成熟, 对汽车各个部件的要求也越来越高。刹车系统作为汽车最主要的

系统之一, 与人们的行车安全和驾驶体验密切相关。为了解决刹车系统中的纯机械结构与驾驶者的脚部直接接触所带来的反作用力对驾驶者造成损伤, 目前机动车辆中的刹车系统多采用带有踏板模拟器的

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目(20A028)。

作者简介: 张劭栋(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力机器人。

通信作者: 刘铮(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力机器人, 电力电子技术。Email: leo\_johnen@csust.edu.cn。

收稿日期: 2024-03-28

电子制动产品<sup>[1]</sup>。

现主流的踏板模拟器的构造和力传动系统通常分为如下 2 种:一是直接压缩弹簧、胶块或其他受压力可变形的材料;二是通过液力传动或气压传动来压缩弹簧、胶块或其他受压力可变形的材料。但是以上 2 种结构均不能准确控制踏板感曲线的精准程度。纯弹簧结构几乎无滞后感,驾驶者在踩制动踏板时十分费力且顶脚,在助力失效的情况下,弹簧模拟方案会大幅度降低驾驶者对主缸的作用力,且弹簧方案存在解耦间隙,紧急制动效率极低;而目前市场上的液压制动踏板模拟器多为负载腔单独分离的状态,占用空间大,且采用液压系统存在液体泄露风险<sup>[1-3]</sup>。因此,市场和大众对刹车踏板模拟器的解耦性能和个性化设计提出了更高的要求。

针对上述问题,本文提出一种基于伺服电机力反馈控制的刹车踏板模拟器,该刹车踏板模拟器通过控制器可根据踏板被踩下时受到的压力值来驱动伺服电机转动调节踏板下降的位移量,并对踏板产生力矩反馈,以提供给驾驶者丰富的刹车脚感变化。其中伺服电机由直流伺服电机系统控制,该系统具有控制简单、运动精度高的特点<sup>[4]</sup>,而传统 PID 直流伺服系统的控制精度低且 PID 参数是通过人工经验调节得到的,并不是最优参数<sup>[5]</sup>。对于刹车踏板模拟器实时变化的压力值大小,显然传统 PID 控制算法无法满足 PID 参数实时变化的需要,因此针对该问题,本文对直流伺服电机系统搭建模型进行分析,通过对比模糊自适应 PID 控制、基于神经网络的自适应 PID 控制和基于遗传优化算法的自适应 PID 控制三种控制算法的控制效果,来确定系统最优的自适应 PID 控制算法。仿真结果表明,将遗传优化算法与 PID 控制算法有效结合,不仅实现了直流伺服电机系统在位置环上 PID 参数的自动优化,而且进一步提高了系统的响应速度和位移精度。

## 1 刹车踏板模拟器系统设计

### 1.1 机械设计

刹车踏板模拟器整体结构如图 1 所示。刹车踏板模拟器主要包括安装座、踏板、力传动机构、行星减速机、联轴器和伺服电机,其中踏板表层上内嵌一个压力传感器,用于采集踏板被踩下时所受到的压力值,同时又在踏板上安装一个位移传感器,能够监测踏板的行程变化。采用曲柄、调节连杆、踏板支臂构成曲柄摇杆机构作为刹车踏板模拟器的力传动机构,在伺服电机的驱动下并经由行星减速机减速后

力传动机构可带动踏板运动,实现对踏板的力反馈控制。

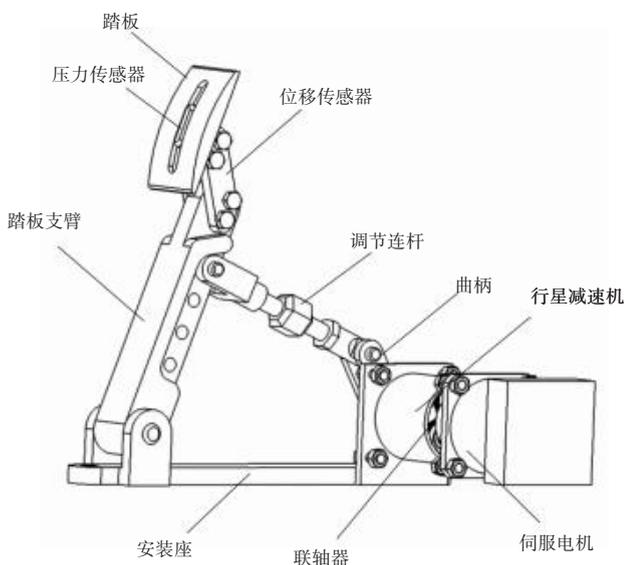


图 1 刹车踏板模拟器整体结构图

Fig. 1 Overall structure of brake pedal simulator

### 1.2 硬件设计

系统硬件部分示意如图 2 所示。系统硬件控制部分使用 STM32F407ZG 芯片作为控制器,该芯片基于 Cortex-M4 内核,适合用来对伺服电机进行控制;控制器实时采集压力传感器和位移传感器的数据,并通过 USART 串口通信与上位机进行通讯,将数据显示到上位机上。当刹车踏板模拟器工作时,控制器根据压力传感器采集的压力值和驾驶者通过上位机预设好的制动踏板感曲线(表示踏板所受压力与踏板运动行程关系曲线)将压力值转化为踏板上升或下降对应的实时行程值,并驱动伺服电机转动使得踏板运动到相应位置。伺服电机选用带编码器的直流无刷减速电机,不仅具有重量轻、体积小特点,而且效率高、稳定性强。



图 2 系统硬件部分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hardware part in the system

刹车踏板模拟器工作流程如图 3 所示。由图 3 可知,刹车踏板模拟器工作流程包括以下步骤:

- (1) 选择刹车脚感。确定控制器中的制动踏板感曲线。
- (2) 模拟刹车体验。对踏板施加压力,控制器根据压力传感器收集到的压力数据和设定的制动踏板感曲线,实时将压力数据转化为踏板上升或下降

的实时行程数据,控制伺服电机转动,进而控制踏板的运动。

(3)行程比对。控制器将踏板实时行程数据与控制器收集到的位移传感器的踏板运动行程数据进行比对,控制器判断比对结果是否一致,若比对结果一致,执行步骤(2);若比对结果不一致,则调整控制系统的PID参数,直至比对结果一致,执行步骤(2)。

(4)踏板复位。停止对踏板施加压力,压力传感器传递给控制器当前踏板所受压力为0的信号,控制器控制伺服电机转动,带动踏板复位至初始位置。

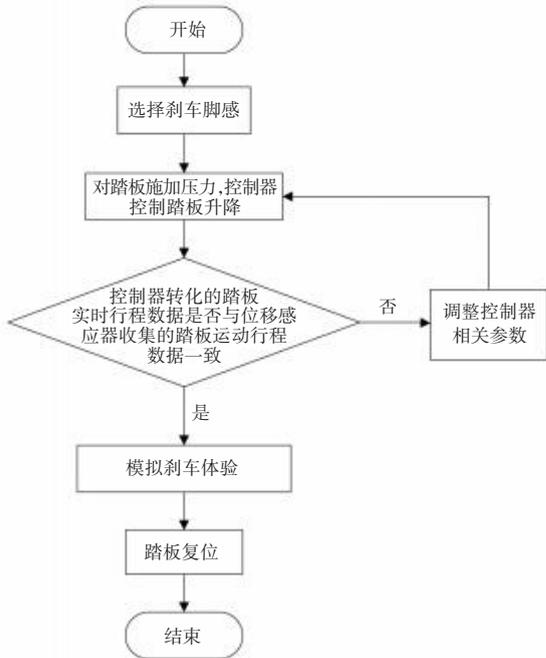


图3 刹车踏板模拟器工作流程图

Fig. 3 Workflow of brake pedal simulator

## 2 直流伺服电机系统

### 2.1 直流伺服电机系统模型

为了建立电动位移装置无刷直流电机的数学模型,首先从直流电机的工作原理出发分析其转矩特性。建立数学模型时,不考虑齿槽效应的影响,并且假定电机的气隙磁通恒定不变,忽略温度效应和磁路饱和,忽略涡流和磁滞损耗<sup>[6]</sup>。

建立电机动态数学模型的方法要点是:首先列出电机主电路电压平衡方程式、轴上力矩平衡方程式和励磁电路电压平衡方程式等基本关系式,在此基础上进行拉普拉斯变换,即可求出直流伺服电机以电枢电压为输入、转速为输出的传递函数表达式。

直流电机的工作原理如图4所示。图4中, $u_a$ 表示电枢电压(单位为V); $R$ 表示电枢电阻(单位

为 $\Omega$ ); $L$ 表示电枢电感(单位为H); $i_a$ 表示电枢电流(单位为A); $k_d$ 表示感应反电动势系数(单位为 $V \cdot s/\text{rad}$ ); $\omega$ 表示转动角速度(单位为 $\text{rad}/\text{s}$ ); $J$ 表示转动惯量(单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ); $k_m$ 表示电机转矩系数(单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{A}$ ); $M_L$ 表示负载转矩(单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ )。

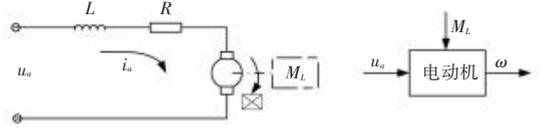


图4 直流电机工作原理

Fig. 4 Working principle of DC motor

根据克希荷夫定律可得到:

$$L \frac{di_a}{dt} + i_a R + k_d \omega = u_a \quad (1)$$

根据负载及电机特性可得到:

$$\frac{LJ}{k_d k_m} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{RJ}{k_d k_m} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{k_d} u_a - \frac{L}{k_d k_m} \frac{dM_L}{dt} - \frac{R}{k_d k_m} M_L \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)并经过拉普拉斯变换,可得直流伺服电机转速的公式如下:

$$\omega(s) = \frac{\frac{1}{k_d} u_a(s) - \left( \frac{L}{k_d k_m} s + \frac{R}{k_d k_m} \right) M_L(s)}{\left( \frac{LJ}{k_d k_m} s^2 + \frac{RJ}{k_d k_m} s + 1 \right)} \quad (3)$$

令 $M_L(s)$ 为0,可得直流伺服电机传递函数,具体公式为:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{u_a(s)} = \frac{1}{k_d} \frac{1}{\frac{LJ}{k_d k_m} s^2 + \frac{RJ}{k_d k_m} s + 1} \quad (4)$$

### 2.2 直流伺服电机系统控制结构

当驾驶者踩下踏板时,踏板上的压力传感器采集到压力后,通过控制器解算出制动踏板感曲线中当前压力下对应的踏板运动的行程,进而驱动伺服电机转动,使踏板运动至期望位置。串级控制系统是改善控制质量的有效方法之一,在过程控制中得到了广泛的应用<sup>[7-8]</sup>,通过采用位置外环和速度内环的双闭环控制,可以有效提高系统的抗干扰性和控制稳定性<sup>[9]</sup>。直流伺服电机的控制结构如图5所示。

控制算法包括位置外环和速度内环的双闭环控制,其中电机的速度环为内环、位置环为外环,在进行参数整定时,要先对速度环的PID参数、再对位置环的PID参数进行整定,两者均采用自适应PID控制算法。

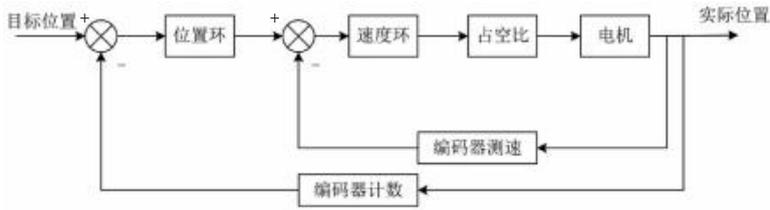


图 5 直流电机控制系统

Fig. 5 DC motor control system

### 3 自适应 PID 控制算法设计

#### 3.1 模糊自适应 PID 控制算法

模糊自适应 PID 算法主要是由模糊控制器和 PID 控制器结合而成, 模糊控制器以误差 ( $e$ ) 和误差变化率 ( $ec$ ) 作为输入, 利于模糊规则对 PID 控制器的参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  进行自适应整定, 使被控对象保

持在良好的动、静态稳定状态<sup>[10-11]</sup>。模糊自适应 PID 工作原理如图 6 所示。与传统 PID 控制相比, 模糊自适应 PID 控制具有更强的适应性, 能够在不同的被控对象上进行调整, 具有更强的稳定性和更高的精度。尤其是对于时变性和非线性较大的被控对象, 模糊自适应 PID 控制有明显的优势<sup>[12]</sup>。

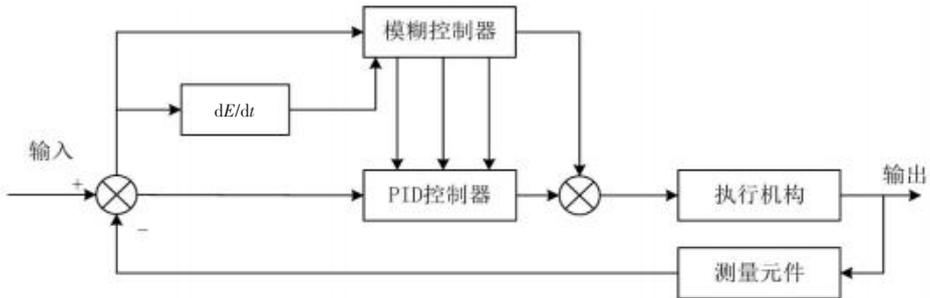


图 6 模糊自适应 PID 工作原理图

Fig. 6 Diagram of fuzzy adaptive PID working principle

本文设计为两输入三输出形式的模糊控制器, 其中输入为误差 ( $e$ ) 和误差变化率 ( $ec$ ), 输出为调节 PID 控制的 3 个参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ; 设计输入输出变量的隶属度函数都选用三角形隶属度函数, 语言值为 {负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB)}, 输入量的误差和误差变化率的论域分别为  $[-5, 5]$  和  $[-6, 6]$ , 输出量的模糊论域为  $[-6, 6]$ 。

模糊控制器的量化系数和比例系数都会影响到控制系统的性能。量化系数  $k_e$  和  $k_{ec}$  对控制系统的稳态误差会产生一定影响。其中, 当  $k_e$  增加时, 系统静态误差减小, 但当  $k_e$  值太大时, 则会引起系统失稳, 表现为:  $k_e$  过大会使控制过程中超调量增大, 使得调节时间延长; 而  $k_{ec}$  的增加能够有效地减少超调量。然而, 当  $k_{ec}$  太大时, 系统响应变慢, 调节时间变短;  $k_{ec}$  过小时, 系统响应速度更快, 但容易引起振荡。比例系数  $k_u$  影响的是系统的动态特性, 当  $k_u$  增加时, 系统超调量增加, 从而造成系统振荡, 而  $k_u$  太小会引起调节时间延长。

由上可以得到, 误差  $e$  的量化系数  $k_e$  为:

$$k_e = \frac{6}{e_{\max} - e_{\min}} = 0.6 \quad (5)$$

误差  $ec$  的量化系数  $k_{ec}$  为:

$$k_{ec} = \frac{6}{ec_{\max} - ec_{\min}} = 0.5 \quad (6)$$

比例系数  $k_u$  为:

$$k_u = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{3} = 4 \quad (7)$$

#### 3.2 基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制算法

BP 模糊神经 PID 控制器是一种基于 BP (Back Propagation) 神经网络的模糊控制与传统 PID 控制相结合的新型控制器, 是在模糊控制和 PID 控制的基础上, 充分发挥了神经网络自学习、自适应和自组织的特点<sup>[13]</sup>。BP 模糊神经网络拓扑结构如图 7 所示。

BP 模糊神经网络拓扑结构由 5 层结构组成<sup>[14-15]</sup>, 各层结构描述如下。

(1) 输入层: 该层包含 2 个节点, 分别对应为误差和误差变化率这 2 个输入量, 作用是向下一层传递输入变量, 由此可得:

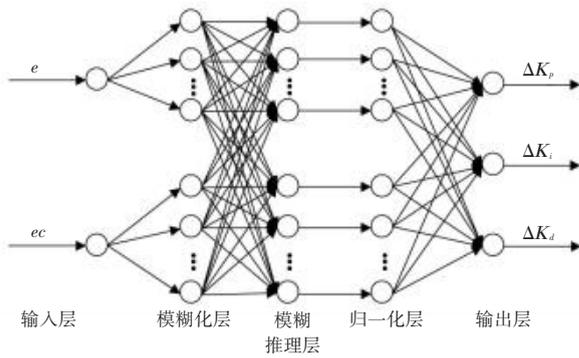


图7 BP模糊神经网络拓扑结构

Fig. 7 Topology of BP fuzzy neural network

$$\begin{cases} \text{In}_i^{(1)} = x_i \\ \text{Out}_{ij}^{(1)} = x_{ij} = x_i \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\text{In}_i^{(m)}$  和  $\text{Out}_{ij}^{(m)}$  分别表示为第  $m$  层节点的输入值和输出值, 这里,  $m = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ;  $x_i$  表示第  $i$  个输入变量;  $x_{ij}$  表示第  $i$  个输入变量在第  $j$  个模糊子集上的隶属度。

(2) 模糊化层: 该层包含 2 个输入, 每个输入对应 7 个语言变量值, 用来对输入变量进行模糊化后产生各语言变量值的隶属度函数, 由此可得:

$$\begin{cases} \text{In}_{ij}^{(2)} = \text{Out}_{ij}^{(1)} \\ \text{Out}_{ij}^{(2)} = \exp\left[-\left(\frac{x_i - c_{ij}}{\gamma_{ij}}\right)^2\right] = A_i^j(x_i) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $c_{ij}$  表示第  $i$  个输入变量在第  $j$  个模糊子集上的隶属度函数中心;  $\gamma_{ij}$  表示第  $i$  个输入变量在第  $j$  个模糊子集上的隶属度函数基宽;  $A_i^j(x_i)$  表示第  $i$  个输入变量在第  $j$  个模糊子集上对应的语言变量值。

(3) 模糊推理层: 该层包含 49 个节点, 即规则点, 对应 49 条模糊规则, 每个节点以模糊化层的误差和误差变化率的模糊子集为条件规则进行模糊推理输出, 由此可得:

$$\begin{cases} \text{In}_i^{(3)} = \text{Out}_{ij}^{(2)} \\ \text{Out}_a^{(3)} = A_1^{n_1}(x_1) \times A_2^{n_2}(x_2) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $a$  表示规则点,  $a = \{1, 2, \dots, 49\}$ ;  $A_1^{n_1}(x_1)$  表示上层第 1 个输入的第  $n_1$  个模糊子集对应的语言变量值;  $A_2^{n_2}(x_2)$  表示上层第 2 个输入的第  $n_2$  个模糊子集对应的语言变量值, 这里  $n_1, n_2 = \{1, 2, \dots, 7\}$ 。

(4) 归一化层: 该层也包含 49 个节点, 作用是将第 3 层输出的 49 个节点的值进行归一化计算, 由此可得:

$$\begin{cases} \text{In}_a^{(4)} = \text{Out}_a^{(3)} \\ \text{Out}_a^{(4)} = \frac{\text{Out}_a^{(3)}}{\sum_{a=1}^{49} \text{Out}_a^{(3)}} \end{cases} \quad (11)$$

(5) 输出层: 该层包含 3 个节点, 作用是进行反模糊化处理, 生成输出控制量, 由此可得:

$$\begin{cases} \text{In}_a^{(5)} = \text{Out}_a^{(4)} \\ \text{Out}_b^{(5)} = \sum_{a=1}^{49} \omega_{ij} \text{Out}_a^{(4)} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $\omega_{ij}$  表示输出层的网络权值;  $b$  表示第 5 层节点,  $b = \{1, 2, 3\}$ 。

BP 模糊神经网络输出结果为:

$$\begin{cases} \Delta K_p = \text{Out}_1^{(5)} \\ \Delta K_i = \text{Out}_2^{(5)} \\ \Delta K_d = \text{Out}_3^{(5)} \end{cases} \quad (13)$$

### 3.3 基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种并行随机搜索优化算法。该算法首先对要做优化的参数进行编码, 再根据适应度函数对各个个体进行评价, 从而得到当前种群的适应度等级, 按照达尔文进化论中“适者生存”的规则进化, 每次进化都根据选择、交叉、变异的原理进行个体间的繁殖进化, 经过不断迭代进化, 适应度高的优良个体被保留下来, 而适应度低的则被淘汰<sup>[16-17]</sup>。图 8 为遗传算法整定 PID 参数流程。

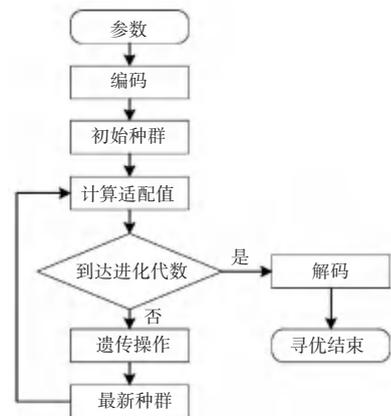


图8 遗传算法PID参数整定流程图

Fig. 8 Flow chart of Genetic Algorithm PID parameter tuning

由图 8 可知, GA 算法对 PID 参数进行整定分为 5 步:

(1) 参数设置。设置迭代次数、交叉分布指数和概率、变异分布指数和概率等参数, 并选定  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三个参数的范围, 将在此范围内寻找最优值。

(2) 选择编码方式确定初始种群。初始种群在

参数范围内随机产生, 每个个体都是一个潜在解, 个体基因可用浮点数形式进行编码, 则寻优对象的个数即为编码长度<sup>[18]</sup>。因此, 本文中遗传算法的编码长度为 3。

(3) 确定适应度函数。适应度作为评价指标, 反映了每一个个体染色体与最优解之间的差距。

(4) 迭代遗传进化。首先计算每一个个体的适应度, 再通过选择算子模拟“优胜劣汰”, 适应度越高的个体被遗传到下一代的可能性就越大; 其次, 通过交叉算子对群体中随机配对的 2 个个体的部分基因片段按一定方式进行相互交换, 从而形成 2 个新的个体, 本文采用单点交叉的方式对基因片段进行随机交换; 最后, 通过变异算子随机对个体编码串上的某些基因用其他等位基本来替换, 经过变异后的种群就成为了下一代种群。在遗传算法进化运算中, 交叉运算是产生新个体的主要方法, 决定了遗传算法的全局搜索能力, 而变异运算只是产生新个体的辅助方法, 仅决定了遗传算法的局部搜索能力。交叉算子和变异算子的共同配合实现了其对搜索空间的全局搜索和局部搜索, 从而使遗传算法能以良好的搜索性能完成最优化问题的寻优过程<sup>[19]</sup>。

(5) 判断是否到达规定迭代次数。若未到达, 则重复步骤 (4) 继续进行迭代遗传运算; 若已到达则解码输出最优值。

对于模糊控制器中的比例系数, 因其关乎着控制系统的特性与性能, 而目前比例系数的取值主要通过反复计算、再配合人工微调来完成, 不仅时间成本高、而且局限性大, 实际控制效果并不理想<sup>[20]</sup>。针对这一问题, 本文将遗传算法的寻优能力运用到寻找比例系数的最优解上, 保证系统的稳定性。本文依据系统超调量、响应时间以及稳态误差这 3 种性能指标, 选用时间乘绝对误差积分准则作为 GA 算法的适应度函数来调整模糊控制器的比例系数。

研究推出的适应度函数为:

$$F_a = \frac{1}{M_s + T + C_s} \quad (14)$$

其中,  $M_s$ 、 $T$ 、 $C_s$  分别表示系统超调量、调节时间和稳态误差。

## 4 系统仿真

为了检验上述 3 种自适应 PID 算法对直流伺服电机系统位置环和速度环的控制效果, 本文建立直流伺服电机控制系统的模拟仿真模型并对其进行验证, 模型的主要参数见表 1。

表 1 直流电机控制系统模型相关参数

Table 1 Parameters related to DC motor control system model

参数	数值
转动惯量 $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$7.2 \times 10^{-9}$
感应反电动势系数 $k_d / (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	$5.1 \times 10^{-3}$
电机转矩系数 $k_m / (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	$2.75 \times 10^{-3}$
电阻 $R / \Omega$	66
电感 $L / \text{H}$	$6 \times 10^{-3}$

因此可以确定直流电机系统模型的传递函数为:

$$G(s) = \frac{195.075}{300s^2 + 0.03s + 97.5375} \quad (15)$$

### 4.1 基于传统 PID 算法的直流伺服电机控制系统仿真

使用 Matlab 软件中的 Simulink 工具搭建基于传统 PID 算法的直流伺服电机控制系统仿真模型, 输入一个阶跃信号, 得到系统的位置响应曲线, 如图 9 所示。

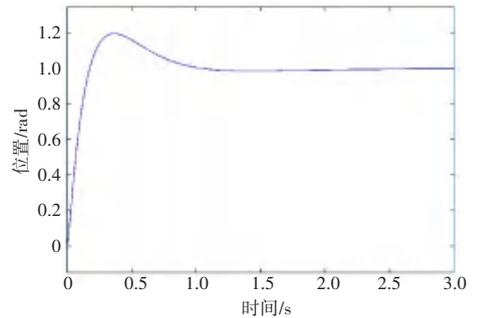


图 9 基于传统 PID 算法的直流伺服电机控制系统位置响应曲线  
Fig. 9 Position response curve of DC servo motor control system based on conventional PID algorithm

由图 9 可知, 在传统 PID 控制算法的作用下, 直流伺服电机控制系统的响应速度较慢, 需要约为 3s 左右才能达到目标位置, 无法满足刹车踏板模拟器实时控制的需求。因此, 需要使用自适应 PID 控制算法来优化直流伺服电机控制系统的响应速度和动态性能。

### 4.2 基于自适应 PID 算法的直流伺服电机控制系统仿真

(1) 采用模糊自适应 PID 控制算法对直流伺服电机控制系统中位置环 PID 控制器进行优化, 根据刹车踏板模拟器的情况, 建立合适的模糊 PID 规则来搭建模糊控制器, 其模糊规则见表 2。

(2) 建立 BP 神经网络学习算法来对直流伺服电机控制系统中位置环 PID 控制器进行优化, 对 BP 模糊神经 PID 算法的部分参数进行优化, 设定系统的输出值为  $r(t)$ , 系统实际的输出值为  $y(t)$ , 定义网络误差函数  $E$  为<sup>[21]</sup>:

$$E = \frac{1}{2} [r(t) - y(t)]^2 \quad (16)$$

表2  $K_p, K_i, K_d$  模糊控制规则表  
Table 2 Fuzzy control rule table of  $K_p, K_i, K_d$

$e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO/NB/NS	ZO/NB/NS	ZO/NM/NS	ZO/ZO/NS	PS/NM/NS	PS/NM/PS	PS/ZO/PS
NM	ZO/NB/NS	ZO/NB/NS	ZO/NM/NS	ZO/NS/NS	PS/NS/NS	PS/ZO/PS	PS/ZO/PM
NS	PS/NB/NS	PS/NM/NS	PS/ZO/NS	PS/ZO/ZO	PS/ZO/ZO	PM/PS/NS	PM/ZO/PM
ZO	PS/NM/NS	PS/NM/NS	PS/NS/NS	PS/ZO/ZO	PS/PS/ZO	PM/PM/PS	PM/PM/PM
PS	PM/ZO/NS	PM/NS/NS	PM/ZO/ZO	PM/PS/ZO	PM/PS/ZO	PB/PM/PB	PB/PB/PM
PM	PM/ZO/NS	PM/ZO/NS	PM/PS/ZO	PM/PM/PS	PM/PM/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PB
PB	PM/ZO/NS	PM/ZO/NS	PM/PS/ZO	PM/PM/PS	PM/PM/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PM

输出层网络权值的学习算法为:

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) - \mu \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} + \alpha [\omega_{ij}(k-1) - \omega_{ij}(k-2)] \quad (17)$$

其中,  $\omega_{ij}(k+1)$  表示输出层网络权值迭代后的修正值;  $k$  表示迭代次数;  $\alpha$  表示惯性因子;  $\mu$  表示学习速率。

采用梯度寻优算法来优化模糊化层的隶属度函数中心和基宽,由此可得:

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - \mu \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} + \alpha [c_{ij}(k-1) - c_{ij}(k-2)] \quad (18)$$

$$\gamma_{ij}(k+1) = \gamma_{ij}(k) - \mu \frac{\partial E}{\partial \gamma_{ij}} + \alpha [\gamma_{ij}(k-1) - \gamma_{ij}(k-2)] \quad (19)$$

其中,  $c_{ij}(k+1)$ 、 $\gamma_{ij}(k+1)$  分别表示模糊化层的隶属度函数中心和基宽迭代后的修正值。

使用上述学习算法进行仿真,得到经过 BP 神经网络优化后的位置环 PID 控制器的 3 个 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  随时间变化曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,经由基于 BP 神经网络的自适应 PID 算法优化后,直流伺服电机控制系统中位置环的 3 个 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  约在 0.3 s 后趋于稳定值,分别为 74.66、0.72、95.0。

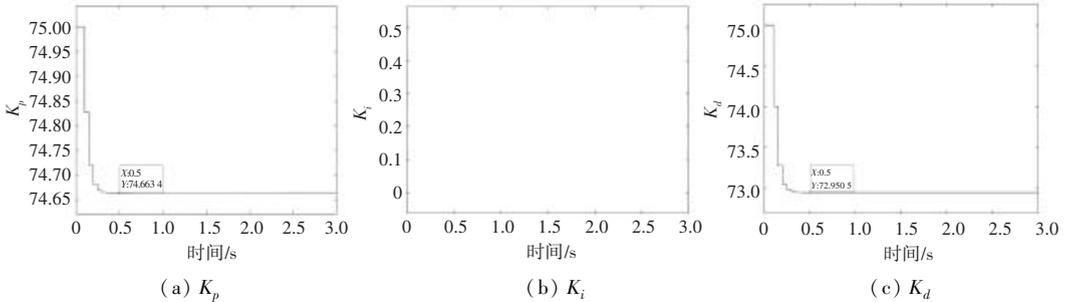


图 10 BP 神经网络优化后  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  随时间变化规律曲线图

Fig. 10 Curve graphs of  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  with time change after BP neural network optimization

(3) 使用遗传算法对直流伺服电机控制系统中位置环 PID 控制器的 PID 参数进行优化,设置的 GA 算法参数见表 3。

表 3 遗传算法优化直流电机系统中位置环 PID 控制器的参数设置  
Table 3 Using Genetic Algorithm to optimise the parameterisation of position loop PID controllers in DC motor systems

参数	数值
迭代次数	20
交叉分布指数	20
变异分布指数	20
交叉概率	0.8
变异概率	0.2

根据对刹车踏板模拟器的运动情况分析,本文选取  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三个参数的范围分别为 0~200、0~200、0~100。代入上述参数进行仿真,得到经遗传

算法进化后的随迭代次数变化的最优个体适应值曲线和  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  参数优化曲线,如图 11 所示。

由图 11(a)可知,当迭代到第 2 次时,最优个体适应度值的变化明显减缓,到第 4 次迭代开始,最优个体适应度值不再变化。从图 11(b)可以看出,直流伺服电机控制系统中位置环的 3 个 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  均在迭代到第 2 次时达到稳定,最终优化结果分别为 23.17、24.43、76.20。

本文设计的传统 PID 控制算法、模糊自适应 PID 控制算法、基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制算法、基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法这 4 种控制算法分别对直流伺服电机控制系统进行控制的 Simulink 仿真模型如图 12 所示,运行得到的位置响应曲线如图 13 所示。

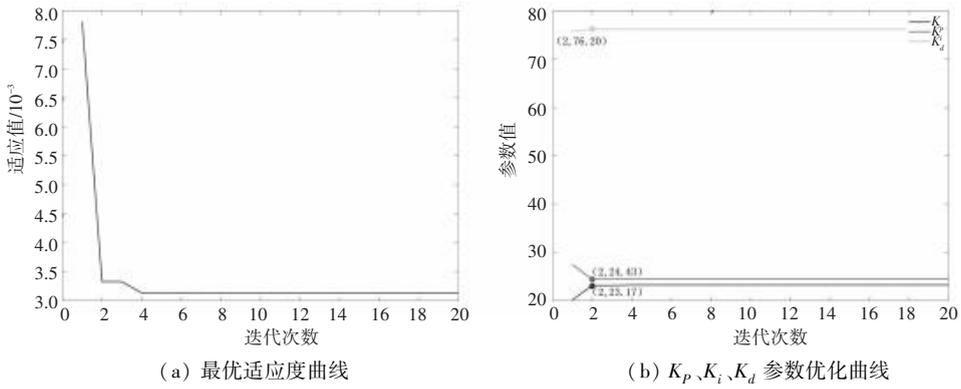


图 11 遗传进化后各参数随迭代次数变化规律曲线图

Fig. 11 Plot of the pattern of change of each parameter with the number of iterations after genetic evolution

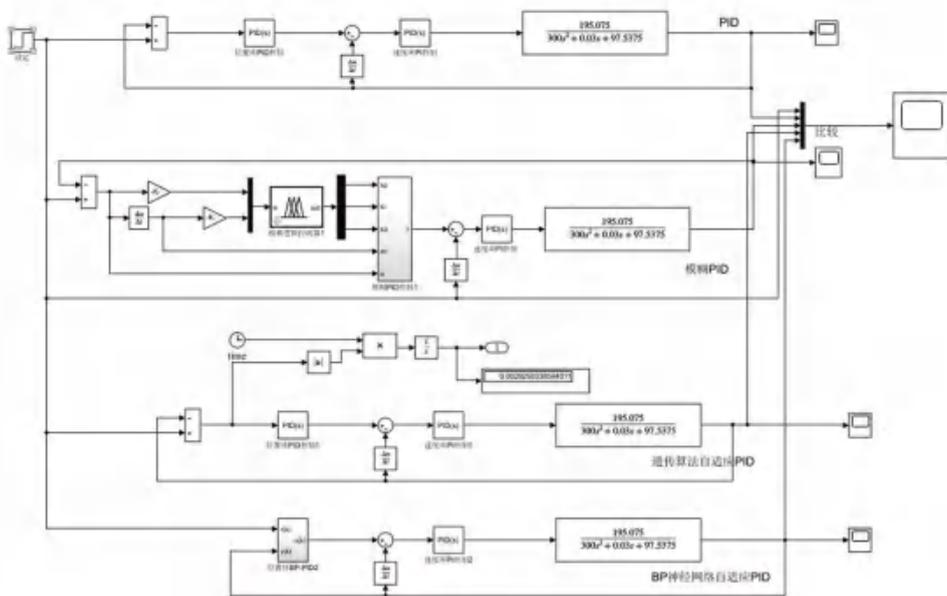


图 12 系统仿真框图

Fig. 12 System simulation block diagram

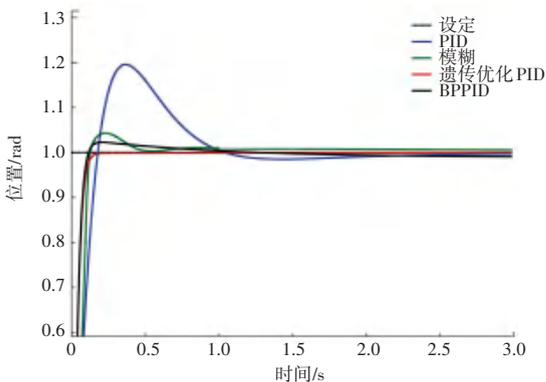


图 13 4 种控制算法下直流伺服电机控制系统位置响应曲线对比  
Fig. 13 Comparison of position response curves of DC servo motor control system under four control algorithms

由图 13 可以看出,相较于传统 PID 控制算法,采用了模糊自适应 PID 控制算法、基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制算法、基于遗传优化算法的自

适应 PID 控制算法这 3 种控制算法优化后的直流伺服电机控制系统都能在一定程度上更快地找到最优值,达到设定值所需要的响应时间更短。对比这 3 种自适应 PID 控制算法,基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法的控制效果显然是最佳的,其达到稳态值的时间最短,并且能够避免陷入局部最优值。

另外,当在系统仿真模型中添加扰动时,4 种控制算法分别控制直流伺服电机控制系统下输出的位置响应曲线如图 14 所示。从图 14 可以看出,在系统增加干扰后,基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法控制下的直流伺服电机控制系统能最快地恢复到稳态值,其抗干扰性和稳定性明显优于另外 3 种控制算法。因此,就对直流伺服电机控制系统的控制而言,基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算

法是最优控制算法。

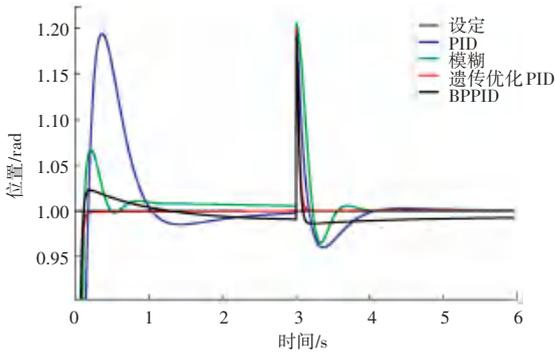


图 14 加入扰动后 4 种控制算法下直流伺服电机控制系统位置响应曲线对比

Fig. 14 Comparison of position response curves of DC servo motor control system under four control algorithms after adding perturbation

## 5 结束语

针对目前主流的 2 类刹车踏板模拟器均无法准确控制踏板感曲线的精准程度的问题,本文设计了一种基于伺服电机力反馈控制的刹车踏板模拟器,该刹车踏板模拟器通过控制器将踏板上的压力传感器采集到的压力值按照事先预设好的制动踏板感曲线转化为踏板相应的实时行程值,并通过驱动伺服电机转动来使得踏板运动到相应位置。在踏板运动过程中,踏板上的位移传感器实时采集位移信息与实时行程值比对,以保证踏板能准确抵达相应位置。

本文设计的刹车踏板模拟器通过控制伺服电机的位置环和速度环使踏板运动至期望位置,然而传统 PID 控制算法控制精度低且无法满足 PID 参数实时变化的需要。针对这一问题,文章在分析了直流伺服电机控制系统的结构组成的基础上,依据模糊自适应 PID 控制算法、基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制算法、基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法这 3 种自适应 PID 控制算法的原理,设计了 3 种针对直流伺服电机控制系统位置环 PID 控制器中 PID 参数的自适应优化方法,通过搭建 Simulink 仿真模型,实现了这 3 种自适应 PID 算法对位置环 PID 参数的优化,并通过输出系统位置响应曲线比较出本系统中最优自适应 PID 算法。实验结果表明,相较于传统 PID 控制算法,本文运用的 3 种自适应 PID 控制算法都能使系统的控制精度和动态响应得到显著提高,其中基于遗传优化算法的自适应 PID 控制算法优化后的系统不仅响应速度最快,而且抗干扰能力最强,是 3 种自适应 PID 控制算法里控制效果最优的。

## 参考文献

- [1] 陶喆, 刘海珍, 高昌晟, 等. 一种刹车踏板模拟器[P]. 中国: CN214084197U, 2021-08-31.
- [2] 金智林, 郭立书, 赵又群, 等. 踏板感觉可控的汽车制动踏板模拟器研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2795-2798.
- [3] WANG Daoming, WANG Biao, ZI Bin, et al. Development and control of a magnetorheological Damper - based brake pedal simulator for vehicle brake-by-wire systems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(6): 407-419.
- [4] 王国林, 殷旻. 基于光栅尺反馈的高精度步进电机位移台系统开发[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(5): 587-591.
- [5] 赵静, 张彬, 孙嘉瞳, 等. 基于 PSO-PID 的电动位移装置伺服电机控制系统[J]. 计算机技术与应用, 2023, 33(11): 9-13.
- [6] 姜彬. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机控制系统[J]. 电脑编程技巧与维护, 2015(15): 19-20.
- [7] 段延德, 师顺吉. 双闭环调速系统特性仿真分析[J]. 冶金自动化, 2022, 46(S1): 104-109.
- [8] 刘广奇, 王希波, 周长峰, 等. 基于单神经元自适应 PID 算法的直流有刷电机位置控制系统设计[J]. 山东工业技术, 2023(2): 43-47.
- [9] 查竟舟, 王磊. 直流电机双闭环调速系统的动态仿真[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(1): 29-31.
- [10] 蒋伟. 模糊自适应 PID 控制算法在电液伺服系统中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [11] 马超. 基于 OPC 的 PCS7 主蒸汽温度模糊自适应 PID 控制系统的设计与实现[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [12] LU Xinyi, WANG Fang. Predefined-time adaptive fuzzy inverse optimal control for uncertain nonlinear systems[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2023, 26(2): 572-584.
- [13] FU Changxin, MA Xiao, ZHANG Lixin. Fuzzy-PID strategy based on PSO optimization for PH control in water and fertilizer integration[J]. IEEE Access, 2022, 10: 4471-4482.
- [14] GONG Chen, YANG Shengquan. Research of oil pump control based on fuzzy neural network PID algorithm[J]. International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls, 2019, 3(4): 63-68.
- [15] 陈飞, 丁曙光, 董玉革. 基于 BP 神经网络优化模糊 PID 控制的防爆门控制策略研究[J]. 现代制造工程, 2022(12): 111-116.
- [16] 代健超, 孟焯, 孙志军, 等. 基于改进自适应遗传算法的小径短绳自动打捆机步进电机 PID 控制[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2024, 50(1): 63-69.
- [17] 陈月婷, 马晓, 王飞, 等. 基于遗传算法优化的模糊 PID 恒温水浴控制系统[J]. 上海计量测试, 2023, 50(5): 5-7.
- [18] JEONG Y S, SHIN K S, JEONG M K. An evolutionary algorithm with the partial sequential forward floating search mutation for large-scale feature selection problems[J]. The Journal of the Operational Research Society, 2015, 66(4): 529-538.
- [19] 薛文平, 张春玲. 基于遗传算法的汽车主动悬架变论域模糊 PID 控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 8-15.
- [20] 郭丽珍, 孔红. 遗传算法联合模糊 PID 的掘进机截割臂摆速控制[J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 246-249.
- [21] 罗旋, 孟海星, 张凯, 等. 模糊神经网络在矿浆浮选速率预测中的应用[J]. 机械设计与制造, 2020(4): 191-193.