潘兆马，向导. 粒子群优化的高铁无线自组网拥塞模糊 PID 算法研究[J]. 智能计算机与应用,2026,16(8):75-81. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.25020701

粒子群优化的高铁无线自组网拥塞模糊 PID 算法研究

潘兆马[1]，向 导[2]
(1 中铁二院工程集团有限责任公司，成都 610000；2 北太振寰(重庆)科技有限公司，重庆 400000)

摘 要：高铁使用无线自组网进行车地通信时常面临拥塞问题,主动队列管理的控制方法是解决网络拥塞的关键,当前大多数控制算法采用比例-积分-微分(PID)控制,其设计与优化大多依赖于经验。然而,高铁无线自组网系统具有无中心控制、节点移动性和多跳无线连接等特性,其传递函数呈现出显著的时滞特性,经典 PID 控制的效果缺乏鲁棒性。本文提出一种基于粒子群优化的无线自组网拥塞模糊 PID 控制算法,使用帕德逼近处理其时滞特性以建立网络的传递函数,使用模糊 PID 对其进行控制,并应用粒子群算法优化模糊 PID 控制的参数。通过 MATLAB/SIMULINK 仿真实验与经典 PID 和模糊 PID 控制进行对比,结果表明本文方法的性能具有显著的优越性。

关键词：无线自组网；高铁通信；PID 控制；主动队列管理；粒子群优化
中图分类号：TP391 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-2163(2026)08-0075-07

Research on congestion fuzzy PID algorithm for high-speed rail wireless ad hoc networks based on particle swarm optimization

PAN Zhaoma[1], XIANG Dao[2]
(1 China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610000, China;
2 Beitai Zhenhuan (Chongqing) Technology Co. Ltd., Chongqing 400000, China)

Abstract: When high-speed trains utilize wireless ad hoc networks for train-ground communication, they often face congestion issues. Active queue management control methods are crucial for addressing network congestion. Currently, most control algorithms employ Proportional-Integral-Derivative (PID) control, with their design and optimization largely relying on empirical methods. However, high-speed rail wireless ad hoc network systems exhibit characteristics such as decentralized control, node mobility, and multi-hop wireless connections, which result in significant time-delay in their transfer functions. The performance of classical PID control lacks robustness in such scenarios. This paper proposes a congestion fuzzy PID control algorithm for wireless ad hoc networks based on Particle Swarm Optimization (PSO). It uses Padé approximation to model the time-delay and establish the network's transfer function, employs fuzzy PID control for regulation, and applies the particle swarm algorithm to optimize the fuzzy PID parameters. Through MATLAB/SIMULINK simulation experiments and comparisons with classical PID and fuzzy PID control, the results demonstrate the significant superiority of the proposed method.

Key words: wireless ad hoc network; high-speed rail communications; PID control; active queue management; particle swarm optimization

0 引 言

高铁应急通信网络通常使用无线自组网技术(Wireless Ad Hoc Network)[1],其节点均为无线收发装置,具有无中心控制、节点移动性、多跳无线连接的特点。无线自组网技术是一种新兴的网络架构,允许设备在没有固定基础设施的情况下,通过无线连接进行通信。这种技术的核心在于其自组织能力,即网络中的设备可以自动识别彼此并建立连接,从而形成一个动态的网络环境。无线自组网的应用范围广泛,包括军事通信、灾难救援、环境监测、智能交通、家庭自动化等。与传统的网络架构相比,无线

基金项目：成都市科技局重点研发支撑计划项目(2023-YF11-00028-HZ)。
作者简介：潘兆马(1989—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:铁路地质灾害与基础设施的智能监测。
通信作者：向 导(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:大数据和系统工程。Email:guide0620@163.com。
收稿日期：2025-02-07

自组网具有更强的灵活性和适应性,其节点可以是移动的,也可以是静止的,且每个节点不仅可以作为数据的接收者,还可以充当数据的转发器,形成多跳网络。这种结构有效降低了对集中式管理的依赖,使网络在面对设备故障或网络攻击时仍能保持稳定性。此外,无线自组网还能够在快速变化的环境中迅速响应,例如在自然灾害后,救援人员可以迅速部署便携设备,建立临时通信网络。无线自组网的关键技术包括路由协议、网络层协议以及安全机制。路由协议用于确定数据在网络中的最佳传输路径,而网络层协议则负责数据的封装与解封装。安全机制则确保数据传输的机密性、完整性和可用性,防止潜在的安全威胁。无线自组网还面临一些挑战,包括节点能量管理、网络安全、QoS(服务质量)保证和网络规模的扩展等。节点能量管理是指在电池供电的情况下,如何有效地延长节点的工作时间。网络安全问题则包括防止未经授权的访问和数据的窃取等。为提高服务质量,研究人员正在探索多种技术手段,以满足不同应用场景在延迟、带宽和丢包率等方面的指标要求。尽管无线自组网技术存在挑战,但其灵活性和适应性使其在现代网络通信中具有重要的应用潜力。随着物联网和智能设备的普及,无线自组网有望在未来的网络架构中扮演越来越重要的角色,为实现更广泛的互联互通提供新的解决方案。

无线自组网的网络资源非常有限,而且受到高铁节点高速移动、传输控制协议(Transmission Control Protocol,TCP)流发送端和接收端距离增加的影响,其网络有效带宽也会变小,这会导致高铁应急通信网络拥塞,影响应急通信的可靠性。因此,研究高铁无线自组网的拥塞控制算法显得尤为重要。

传统的拥塞控制通过 TCP 端到端进行,但并不能有效避免拥塞发生,因此便引入了网络节点自主参与拥塞控制的方法,称为主动队列管理(Active Queue Management, AQM)。AQM 的原理是通过动态监控和控制队列长度以及系统负载,在网络流量或请求到达时预先采取措施,如丢弃、延迟或调整优先级,以防止队列过长导致系统拥堵或延迟,从而提高资源的利用率和响应速度。AQM 通过预测并调整流量控制策略,避免队列积压过多,保持系统的高效运行。随着动态环境变得复杂,一些学者开始在 AQM 中引入控制理论,基于控制理论的 AQM 相比传统 AQM 策略更具鲁棒性。陈亮等[2]研究了基于 PID 控制的 AQM 策略的稳定性,通过给出稳定区域来进行参数设计,其结果相比工程试凑的 PID 控制更好,但距离最优控制效果仍有不少差距;胡为民等[3]研究了基于改进神经元 PID 的无线拥塞控制,其通过在神经元算法的加权系数中引入二次型性能指标增强了传统 PID 控制的鲁棒性;孙慧玉等[4]提出了一种单神经自适应 PID 拥塞控制方法,其性能相比传统 PID 在动态的网络环境下有一定提升;佟磊[5]提出了一种基于自整定 PID 算法的无线通信网络传输链路拥塞控制方法,该方法利用线性 PID 控制器设计无线通信网络传输链路拥塞控制器,以灵活适应不同的拥塞控制需求;李帅[6]研究了基于神经网络的主动队列管理算法,并通过仿真验证了所提出算法的可行性和优越性;关康倩[7]对面向数据中心的拥塞控制策略进行了研究,提出将平滑排队延迟波动的 RLS 滤波器和保持队列稳定的 PID 控制器相结合的 AQM 控制器 PID-R,实现对发送速率进行有区别的动态调整,从而提高公平性。这些研究在一定程度上弥补了传统 PID 在控制 AQM 方面的不足,但其性能均不具有最优性,且在面对不同链路容量的网络时鲁棒性不强。

为解决上述问题,本文提出一种基于粒子群优化的高铁无线自组网拥塞模糊 PID 控制算法。使用并联模糊 PID 对 AQM 进行控制,并联模糊 PID 可以在线实时更新 PID 控制器的参数,增强了鲁棒性。应用粒子群算法对并联模糊 PID 的参数进行全寻优,以获得最优的控制效果。

1 算法

基于控制理论的 AQM 算法从系统的角度分析 TCP 拥塞控制模型,建立其数学模型并使用控制理论中的算法进行控制。本节将对被控对象数学模型、模糊 PID 控制器设计和粒子群优化算法进行叙述。系统整体的控制方框图如图 1 所示。

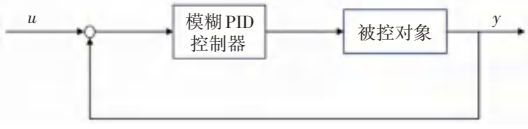


图 1 系统方框图

Fig. 1 System block diagram

1.1 被控对象

基于流体流理论可以得到 TCP/AQM 的微分方程[8],对该微分方程进行线性化处理[9]可以建立 AQM 作用下 TCP 连接的拥塞窗口的非线性化动态模型,公式如下:

$$\begin{cases}\dot{W}(t)=\dfrac{1}{R(t)}-\dfrac{W(t)}{2}\dfrac{W(t-R(t))}{R(t-R(t))}p(t-R(t))\\ \dot{q}(t)=-C+\dfrac{N(t)}{R(t)}W(t)\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}\dot{W}(t)=\dfrac{\mathrm{d}W(t)}{\mathrm{d}t}\\ \dot{q}(t)=\dfrac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t}\end{cases} \tag{2}$$

式中：W 为 TCP 拥塞窗口大小，q 为队列长度，R 为往返时间，C 为链路容量，N 为负载，$p(t)$ 为分组丢弃概率。

对式(1)进行线性化和拉普拉斯变换，得到被控对象的传递函数，公式如下：

$$P_0(s)=\frac{\dfrac{C^2}{2N}}{\left(s+\dfrac{2N}{CR_0{}^2}\right)\left(s+\dfrac{1}{R_0}\right)}e^{-sR_0} \tag{3}$$

式中：R_0 为系统稳态下的往返传输时间，N 为 TCP 连接数目，C 为链路容量。

根据高铁无线自组网络环境，可以给定 R_0 为 0.25 s，则系统的时滞部分为：

$$D(s)=e^{-0.25s} \tag{4}$$

时滞部分本质上是无穷维的系统，直接分析较为困难，因此使用帕德逼近对其进行近似处理。对纯延时环节，帕德逼近表示如下式：

$$e^{-\tau s}\approx\frac{N_r(\tau s)}{D_r(\tau s)} \tag{5}$$

$$\begin{cases}N_r(\tau s)=\displaystyle\sum_{k=0}^{r}\frac{(2r-k)!}{k!\,(r-k)!}(-\tau s)^k\\ D_r(\tau s)=\displaystyle\sum_{k=0}^{r}\frac{(2r-k)!}{k!\,(r-k)!}(\tau s)^k\end{cases} \tag{6}$$

基于上述公式推导出被控对象时滞部分的近似传递函数：

$$D(s)=\frac{-s+8}{s+8} \tag{7}$$

被控对象整体的传递函数为：

$$P_0(s)=\frac{-\dfrac{C^2}{2N}(s-8)}{\left(s+\dfrac{2N}{CR_0{}^2}\right)\left(s+\dfrac{1}{R_0}\right)(s+8)} \tag{8}$$

1.2　模糊 PID 控制

模糊 PID 控制是一种结合了模糊控制理论和经典 PID 控制技术的控制方法，旨在提高控制系统的性能和鲁棒性。PID 控制是工业控制中最常用的控制策略之一，但面对模型不确定、结构复杂的系统时，传统 PID 控制的效果往往不尽如人意。模糊控制则通过模拟人类的决策过程，以模糊逻辑处理不确定性信息，因此将两者结合起来可以克服各自的不足之处。模糊 PID 控制的基本思路是使用模糊逻辑来调整 PID 控制器的参数，使其能更好地适应系统的动态变化。具体来说，模糊 PID 控制器通过设定一组模糊规则，根据当前的误差和误差变化率来实时调整 PID 参数，包括比例增益、积分时间和微分时间。这种实时调整的能力使得控制器能够在系统负载变化、环境变化或外部扰动的情况下保持稳定和精确的控制效果。模糊 PID 控制的设计通常包括 3 个主要步骤：模糊化、规则评估和去模糊化。模糊化阶段将系统的输入信号，如误差和误差变化率，转化为模糊集，这些模糊集通过隶属函数表示其在不同模糊状态下的可能性。规则评估阶段利用预先定义的模糊控制规则库，这些规则通常以“if-then(如果-那么)”的形式表示，基于模糊输入推理 得到模糊输出。最后，去模糊化阶段将模糊输出转化为清晰的控制信号，以调整 PID 参数。模糊 PID 控制器的优势在于其良好的适应性和灵活性，可以处理复杂的非线性系统和不确定性。在许多实际应用中，模糊 PID 控制已被成功应用于温度控制、液位控制、速度控制等多个领域。不仅提高了系统的动态响应能力，还降低了超调和稳态误差。此外，由于模糊 PID 控制器不需要精确的数学模型，因此在一些难以建模或模型不完全的系统中，其性能尤为突出。随着计算技术的进步和控制理论的发展，模糊 PID 控制在工业自动化和智能控制领域的应用前景广阔，成为现代控制工程的重要研究方向之一。

本文采用并联结构模糊 PID 控制算法[10]，其控制结构图如图 2 所示。

基于 Sugeno 型模糊模型设计模糊控制器，该模型是一种利用模糊逻辑控制理论来处理复杂系统控制问题的方法，其核心在于将模糊逻辑与确定性模型相结合，以实现对动态系统的有效控制。Sugeno 模糊控制器的基本原理是通过建立一个模糊规则库，将输入变量的模糊集映射到输出变量的具体值，从而实现控制决策。与传统的模糊控制方法不同，Sugeno 模糊控制的输出是一个线性组合，可以是常数或线性函数，这使得其在控制精度和计算效率上具备显著优势。Sugeno 模糊控制器在系统的动态响应、稳态性能和鲁棒性方面表现出色，适用于许多实际应用，包括温度控制、速度控制、流量控制等领域。

每个输入分为正向和负向,规则数量为 4 条。所有的输入都标准化到[-10,10],输出区间为[-20,20]。设 e 为系统误差,ce 为系统误差的变化率,u 为输入,则模糊控制的规则见表 1。

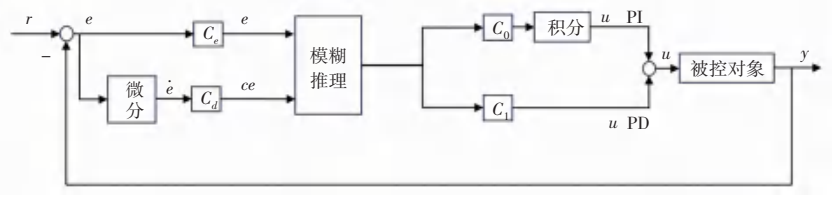


图 2 并联模糊 PID 控制

Fig. 2 Parallel fuzzy PID control

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table

规则编号	前提条件	控制输出
1	e == Negative & ce ==Negative	u = Min
2	e == Negative & ce == Positive	u = Zero
3	e == Positive & ce == Negative	u = Zero
4	e == Positive & ce == Positive	u = Max

表 1 中,规则 1 表示当误差和误差变化率均为负时,控制器的输出设置为最小值;规则 2 表示当误差为负而变化率为正时,输出为零;规则 3 表示当误差为正而变化率为负时,输出同样为零;规则 4 表示当误差和变化率均为正时,控制器输出设为最大值。这些规则通过模糊推理系统进行处理,从而生成对应的控制输出,使得系统能够根据实时状态调整其行为。控制面如图 3 所示,该模糊控制的控制面为非线性。其两个输入的隶属度图像如图 4 所示。

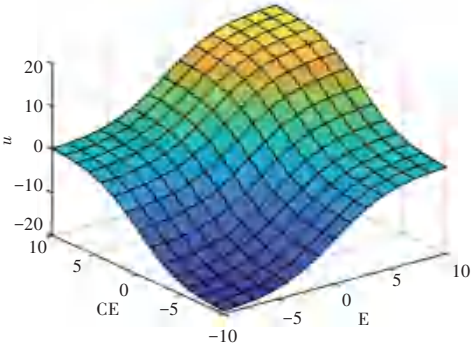
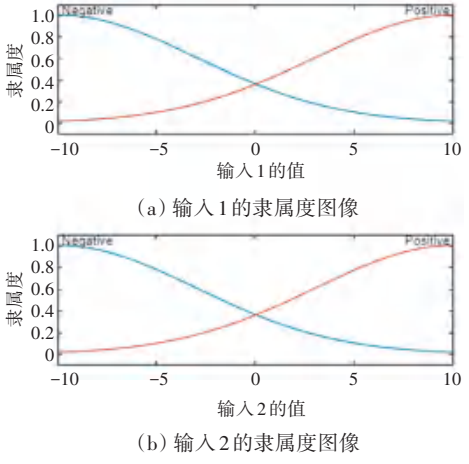


图 3 非线性控制面

Fig. 3 Nonlinear membership surface



(a) 输入 1 的隶属度图像

(b) 输入 2 的隶属度图像

图 4 隶属度函数图

Fig. 4 Plot of the affiliation function

1.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于群体智能的优化算法[11],源于对鸟群觅食行为的模拟。该算法通过粒子之间的协作与信息共享来探索最优解,广泛应用于优化[12-15]、机器学习[16-18]和预测[19-21]等复杂问题的求解。其步骤如下:

(1)初始化:在算法的初始阶段,随机生成 N 个粒子的位置 x_i 和速度 v_i,其中 $i = 1,2,3,\cdots,N$,N 为种群规模。粒子的初始位置和速度可以表示为:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{id}) \tag{9}$$

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{id}) \tag{10}$$

其中 d 是问题的维度。

(2)评估适应度:对每个粒子,计算其适应度值 $f(x_i)$,适应度函数通常是需要优化的目标函数。

(3)更新个人最优(pBest)和全局最优(gBest):针对个人最优,对于每个粒子 i,如果其当前适应度优于之前的最佳适应度,则更新个人最优位置 pBest:

$$p\text{Best}_i = \begin{cases} x_i, & \text{if } f(x_i) < f(p\text{Best}_i) \\ p\text{Best}_i, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11}$$

(4)针对全局最优,在所有粒子中找到最优的粒子,并更新全局最优位置 gBest:

$$g\text{Best} = \underset{x_i}{\operatorname{argmin}} f(x_j),\ j = 1,2,\cdots,N \tag{12}$$

(5)更新速度和位置:速度更新公式如下:

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p\text{Best}_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g\text{Best} - x_i(t)) \tag{13}$$

其中,w 是惯性权重,用于平衡探索和利用,c_1

和 c_2 是学习因子，分别影响对个人最优和全局最优的吸引程度。r_1 和 r_2 是 [0,1] 之间的随机数。

位置更新公式如下：

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1) \tag{14}$$

(6)迭代过程：重复步骤(2)~(5)，直到满足停止条件(例如，达到最大迭代次数或适应度达到预设阈值)。

本文需要使用粒子群算法优化的参数是模糊 PID 控制的参数 C_e、C_d、C_0 和 C_1，目标函数选择输入信号和系统输出信号之间的误差和，公式如下：

$$L=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{|r(i)-y(i)|},\ n=1,2,3,\cdots,N \tag{15}$$

式中：n 为仿真的总时间步数量；$y(i)$ 为系统在第 i 步的输出；$r(i)$ 为系统在第 i 步的输入。

2　实验

实验选择传统 PID 控制和传统并联结构模糊 PID 控制作为对照，分别在链路容量为 125、250 和 500×10^{-6} 的场景下进行实验。当系统的链路容量变化时，被控对象的传递函数也会随之改变，因此控制器参数也需要重新整定。当链路容量为 125×10^{-6} 时，被控对象的传递函数为：

$$G(s)=\frac{-390.62(s-8)}{(s+5.12)(s+4)(s+8)} \tag{16}$$

当链路容量为 250×10^{-6} 时，被控对象的传递函数为：

$$G(s)=\frac{-1\,562.5(s-8)}{(s+2.56)(s+4)(s+8)} \tag{17}$$

当链路容量为 500×10^{-6} 时，被控对象的传递函数为：

$$G(s)=\frac{-6\,250(s-8)}{(s+1.28)(s+4)(s+8)} \tag{18}$$

本文将采用 Ziegler-Nichols 方法对传统 PID 控制器的参数进行整定，Ziegler-Nichols 方法是一种经典的 PID 控制器参数调节方法，旨在通过系统的响应特性来确定合适的比例、积分和微分增益。该方法的基本原理是通过实验测量来获得系统的临界增益和临界周期，进而根据这些参数来设定 PID 控制器的增益值。Ziegler-Nichols 方法的核心在于通过调节比例增益，使系统达到一个临界状态，即系统开始出现持续的振荡，而不再趋于稳定。具体步骤包括首先将 PID 控制器中的积分和微分项设为 0，只保留比例控制，并逐渐增加比例增益直到系统输出开始振荡，这时的增益称为临界增益 K_c，而振荡的周期称为临界周期 P_c。然后，基于这些实验数据，Ziegler-Nichols 方法提供了一套经验公式，用于计算 PID 控制器的比例、积分和微分增益。对于典型的 PID 控制器，比例增益 K_p、积分时间 T_i 和微分时间 T_d 的计算公式分别为 $K_p=0.6K_c$，$T_i=P_c/2$，$T_d=P_c/8$。通过这些计算得到的 PID 参数可以使控制系统在大多数情况下表现出较好的动态响应和稳态性能。Ziegler-Nichols 方法的优点是简单、易于实施，且不需要精确的数学模型，适用于多种工业控制系统。

不同链路容量下的 PID 控制器参数见表 2。

表 2　不同链路容量下 PID 参数表

Table 2　PID parameters for differentpacket rates

Parameters	C		
	125×10^{-6}	250×10^{-6}	500×10^{-6}
K_p	−0.001 2	$-1.466\,5\times10^{-4}$	0.001 7
K_i	0.011 7	0.001 5	0.001 3
K_d	$2.924\,7\times10^{-5}$	$3.666\,2\times10^{-6}$	$4.024\,2\times10^{-4}$

并联模糊 PID 控制的参数需根据整定好的传统 PID 控制参数进一步整定。由于输入范围设定为[−10,10]，因此取输入量化因子 $C_e=10$，其余参数 C_d、C_0 和 C_1 的计算公式如下：

$$C_d=\frac{C_e\left(K_p-\sqrt{K_p^2-4K_iK_d}\right)}{2K_i} \tag{19}$$

$$C_0=\frac{K_i}{C_e} \tag{20}$$

$$C_1=\frac{K_d}{C_d} \tag{21}$$

使用粒子群优化算法对不同链路容量下的模糊 AQM 进行优化，设定 C_e、C_d、C_0 和 C_1 的优化下限分别为−10、−10、−10、−10，上限分别为 10、5、5、5，粒子群优化算法的其他参数见表 3。

表 3　粒子群优化算法参数表

Table 3　Parameter list of particle swarm optimization algorithm

参数	取值
Function Tolerance	0.000 001
Inertia Range	[0.1,1.1]
Initial Swarm Span	2 000
Max Iterations	800
Max Stall Iterations	20
Max Stall Time	0.25
Self Adjustment Weight	1.49
Social Adjustment Weight	1.49
Swarm Size	100

不同链路容量下粒子群算法的目标函数下降曲线如图 5 所示。

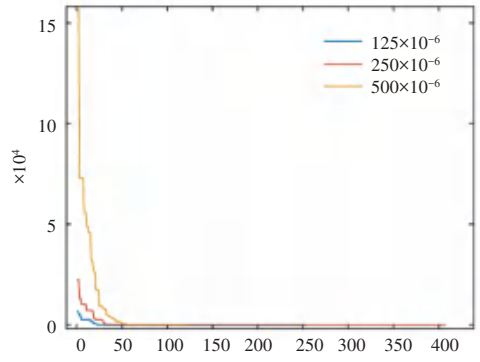


图 5 目标函数下降曲线

Fig. 5 Objective function descent curve

针对不同链路容量下的 AQM 进行仿真，对比传统 PID 控制，传统并联结构模糊 PID 控制与本文方法的响应曲线，以链路容量 $C = 125\times10^{-6}$ 为例，结果如图 6 所示。

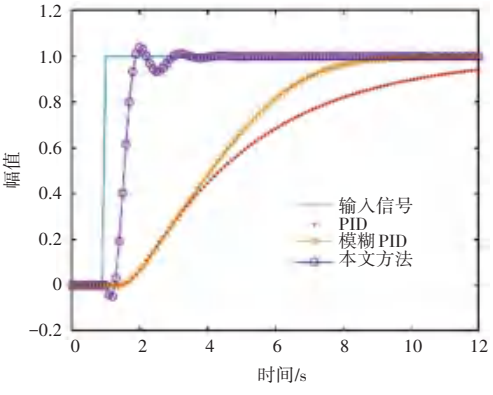


图 6 125×10^{-6} 时的响应曲线

Fig. 6 Response curve at 125×10^{-6}

$C = 250\times10^{-6}$ 时如图 7 所示。

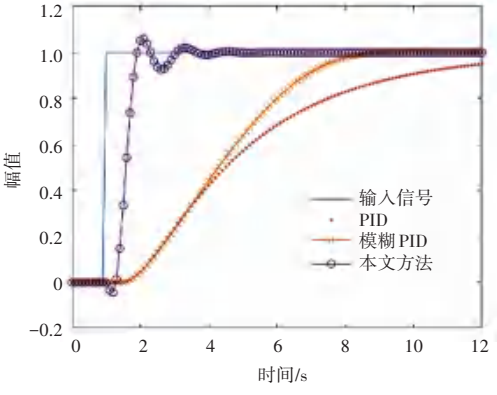


图 7 250×10^{-6} 时的响应曲线

Fig. 7 Response curve at 250×10^{-6}

$C = 500\times10^{-6}$ 时如图 8 所示。

观察上述图像不难发现，当链路容量为 125×10^{-6} 和 250×10^{-6} 时本文方法的控制效果显著优于传统 PID 控制和模糊 PID 控制，稳定时间和上升时间都大幅度领先。当链路容量为 500×10^{-6} 时，传统并联结构模糊 PID 控制出现明显震荡，但本文方法相较于传统 PID 和传统并联结构模糊 PID 控制仍有优势。

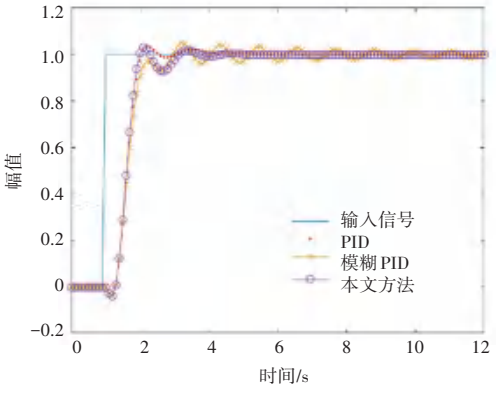


图 8 500×10^{-6} 时的响应曲线

Fig. 8 Response curve at 500×10^{-6}

3 结束语

针对高铁无线自组网车地通信的拥塞问题，本文提出一种基于粒子群优化的模糊 PID 控制算法。首先分析高铁无线自组网的特性，指出传统 PID 控制算法在应对高铁无线自组网时滞特性时存在不足；基于流体流理论建立 TCP/AQM 微分方程模型，通过帕德逼近处理了系统的时滞部分并得到了被控对象的传递函数；在控制算法设计方面，文章提出了并联结构的模糊 PID 控制算法，并通过粒子群优化算法对模糊 PID 的参数进行了优化，以适应不同链路容量下的网络环境。通过 MATLAB/SIMULINK 仿真实验，仿真结果表明该算法相比传统 PID 控制、传统并联结构模糊 PID 控制，在不同链路容量下均具有显著性能优势。为高铁无线自组网的拥塞控制提供了有效解决方案。随着无线通信技术的不断发展，未来可探索更复杂的网络环境、更高效的优化算法及实际部署测试以提升算法的适应性与鲁棒性。

参考文献

[1] 李翠然，钟章队，谢健骊，等. 铁路应急通信网络组呼的组播路由算法分析[J]. 中国铁道科学，2012，4：83-90.

[2] 陈亮，张宏. 无线自组网拥塞 PID 算法稳定性研究[J]. 计算机应用，2008，28(7)：1841-1843.

[3] 胡为民. 改进神经元 PID 无线拥塞研究[J]. 计算机工程与应用，2010，46(35)：123-125.

[4] 孙慧玉，姜文刚. AdHoc 网络单神经自适应 PID 主动队列管理[J]. 计算机仿真，2014，31(1)：307-310.

[5] 佟磊. 基于自整定 PID 算法的无线通信网络传输链路拥塞控制方法[J]. 微型电脑应用，2024，40(8)：24-28.
[6] 李帅. 基于神经网络的主动队列管理算法研究[D]. 沈阳：东北大学，2021.
[7] 关康倩. 面向数据中心的拥塞控制策略研究[D]. 西安：西安工业大学，2024.
[8] Misra V，Gong W B，Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[C]//Proceedings of the Conference on Applications，Technologies，Architectures，and Protocols for Computer Communications. 2000：151-160.
[9] Hollot C V，Misra V，Towsley D，et al. A control theoretic analysis of RED[C]//Proceedings of IEEE/INF 2001 Conference on Computer Communications. Piscataway，NJ：IEEE，2001：1510-1519.
[10] Teodorescu H N L，Kandel A，Jain L C. Fuzzy logic and neuro-fuzzy systems in medicine and biomedical engineering：a historical perspective[M]// Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine. CRC Press，2017：1-18.
[11] Eberhart R，Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway，NJ：IEEE，1995：39-43.
[12] 王成，王朝立，赵忆文. 基于改进粒子群优化的乒乓球发球机械手轨迹规划[J]. 智能计算机与应用，2022，12(4)：1-9.
[13] 李起磊. 基于粒子群算法优化的电动叉车复合电源能量管理策略研究[J]. 现代机械，2025(1)：63-67.
[14] 王发麟，龚建华，蒋英吉，等. 基于多重规则粒子群算法的复杂机电产品线缆自动布线[J]. 科学技术与工程，2025，25(5)：1996-2008.
[15] 康瑞强，施成华，孙晓贺，等. 基于响应面-粒子群算法的大体积混凝土温度裂缝控制方法[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(12)：4505-4518.
[16] 袁世一. 基于粒子群优化 GRU 的粮食产量预测[J]. 智能计算机与应用，2024，14(8)：109-114. DOI：10. 20169/j. issn. 2095-2163. 240818.
[17] 寇鹏远，王伟，刘建勇，等. 基于粒子群算法优化支持向量回归的电火花加工工艺指标预测模型[J]. 电加工与模具，2024(5)：21-25.
[18] 彭治文，陈晓亮，朱珈辰，等. 基于 PSO-BP 神经网络的游泳池式反应堆堆芯功率调节系统优化研究[J]. 核动力工程，2024，45(4)：173-180.
[19] 刘奇，梁智昊，訾建潇. SMOGN 过采样下导水裂隙带高度的 MPSO-BP 预测模型[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(11)：72-85.
[20] 李林波，刘子杨，杨建军，等. 基于 PCA-NIPSO-SVM 组合的铜锍中锑含量预测模型[J]. 有色金属工程，2024，14(11)：108-118.
[21] 杜敏，张社荣，王超，等. 沥青混凝土心墙砂砾石坝的地震响应预测模型与应用[J]. 水力发电学报，2025，44(1)：41-53.