

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211907

## 改进 PSO-BPNN 供水泵站变频恒压 PID 控制\*

余梦龙<sup>1</sup> 张进朝<sup>2</sup> 文豪<sup>1</sup> 郭华<sup>2</sup> 何莉<sup>1</sup>

(1. 深圳大学机电与控制工程学院 深圳 518060; 2. 深圳市东深电子股份有限公司 深圳 518057)

**摘要:** 供水泵站是变频恒压系统,要求保障水压稳定,且在干扰情况下能快速响应并恢复稳定。为提升系统稳定性、高效性,提出一种改进 PSO-BPNN 的 PID 控制方法。首先构建供水泵站变频恒压控制模型,再基于 BPNN 实现 PID 非线性控制,提出一种 PSO 惯性权重改进策略,以提升 PID 参数的计算效率,从而更好地满足供水泵站控制需求。实验表明,本文算法响应快速、无超调,且具有稳定的非线性信号跟踪性能。相比 BPNN、PSO-BPNN 的两种 PID 控制算法,本文算法在恒压实验的调节时间缩短了 29.6% 和 2.8%;在干扰实验中,超调量减少了 34.6% 和 19.9%,稳定时间缩短了 7.3% 和 1.6%。本文算法可提升供水泵站系统的稳定性和高效性。

**关键词:** 供水泵站;变频恒压;PID 控制;BPNN;PSO 算法

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

## Variable frequency and constant pressure PID control of water supply pump station based on improved PSO-BPNN algorithm

Yu Menglong<sup>1</sup> Zhang Jinchao<sup>2</sup> Wen Hao<sup>1</sup> Guo Hua<sup>2</sup> He Li<sup>1</sup>

(1. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Dongshen Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** Water supply pumping station is a variable frequency and constant pressure system to ensure water pressure stability, which can respond quickly and stably under the disturbance. In order to improve the stability and efficiency, this article proposes an improved PSO-BPNN adaptive PID control method. Firstly, the variable frequency and constant pressure control model of water supply pump station is established. Then, PSO weight iterative strategy based on BPNN is proposed to improve optimization efficiency of PID parameters, so as to preferably satisfy the control requirements. The results show that the proposed algorithm responds quickly without overshoot, and shows stable tracking capability for nonlinear signal. Compared with the PID control algorithms of BPNN and PSO-BPNN, the proposed algorithm can shorten the regulation time by 29.6% and 2.8% in the constant voltage experiment, and the overshoot is reduced by 34.6% and 19.9%, and the stabilization time is shortened by 7.3% and 1.6% in the disturbance experiment. The algorithm can improve the stability and efficiency of water supply pumping station system.

**Keywords:** water supply pump station; variable frequency and constant pressure; PID control; BPNN; PSO algorithm

## 0 引言

供水泵站是一项具有灌溉、供水、排水及调水功能的综合性水利设施,在水资源调配、城市供水等方面发挥重大作用<sup>[1]</sup>。传统调节阀门实现恒流供水方式,运行效率较低,容易造成水资源浪费,而变频恒压技术能克服传统供水方式的缺点,达到节能降耗的目的<sup>[2]</sup>。因此,当前研究变频恒压控制技术,提升供水泵站系统控制性能成为热点<sup>[3-4]</sup>。

比例积分微分控制 (proportional-integral-derivative control, PID) 结构简单且易于实现,被广泛应用于各种控制系统中<sup>[5]</sup>。供水泵站变频恒压控制系统存在非线性和时滞性等特点<sup>[6]</sup>,传统 PID 控制方法响应速度较慢且抗干扰能力较弱。因此,需优化 PID 控制,提升其控制稳定性和高效性。反向传播神经网络 (back propagation neural network, BPNN) 是一种误差反传的多层前馈网络,利用其

收稿日期:2022-11-01

\* 基金项目:国家重点研发计划(2019YFB2102703)、广东省教育厅重点领域专项(2020ZDZX1052)、深圳市基础研究重点项目(JCYJ20210324120209027)资助

非线性映射能力可对 PID 参数进行自适应调整<sup>[7]</sup>。许永强等<sup>[8]</sup>结合 BPNN 对 PID 参数进行自适应整定,改善了水轮机系统的动态性能;Meng 等<sup>[9]</sup>提出一种 BPNN-PID-Smith 预测补偿控制方法,提升了水肥 pH 调节系统响应速度;然而,网络初始权值随机选取对 BPNN 性能影响较大,易出现收敛慢,训练结果差距大等问题。为此,李航等<sup>[10]</sup>提出了一种基于遗传算法的 BPNN-PID 控制算法,进一步优化系统的控制性能;张涛等<sup>[11]</sup>在聚合酶链式反应仪的 BPNN 的 PID 温度控制算法中引入改进的灰狼算法,优化 BPNN 初始权值,提升系统控制精度。供水泵站系统采用二阶延迟模型,控制要求更高,且应具备良好的抗干扰能力。因此,需要针对供水泵站系统特性和工作需求优化控制算法。

结合供水泵站变频恒压控制系统非线性、时滞性特点,为提高系统的高效性和稳定性,本文采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO),提出一种改进的 PSO-BPNN 的 PID 控制算法 (IPSO-BPNN-PID),利用 IPSO 优化 BPNN 初始权值,提高 BPNN 对 PID 参数的计算效率,进而自适应调节供水泵站系统工作状态,使用户处水压能快速达到供水标准水压且保持稳定。最后与 BPNN、PSO-BPNN 等 PID 控制算法进行动态性能对比分析,并进行输入信号跟随实验和间断干扰实验。实验结果表明,本文算法具有更好的动态性能、控制稳定性和抗干扰性,为供水泵站变频恒压系统控制器的设计提供可行依据。

### 1 供水泵站控制系统建模

在供水系统中,供水压力体现了用户的需求特点,当供水距离较远或用水地点位置较高,泵站系统所需要的供水压力就越大。目前,供水泵站系统通常采用变频恒压技术以保持用户侧的管道水压稳定,其工作原理如图 1 所示。压力传感器用于监测水泵管网水压,并将水压变化以电信号形式传至控制器,控制器计算获得控制量,进而控制电机转速,调控水泵工作状态,以稳定水泵管网压力。

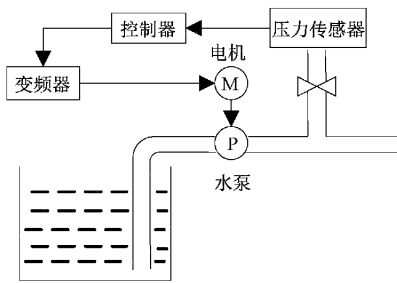


图 1 变频恒压供水泵站示意图

对于不同的水压偏差值,控制器需要计算出相应的控制量并调整变频器输出电压的频率,进而对电机转速进行平稳调节,其中变频器频率与电机转速关系为:

$$n = \frac{60f(1-s)}{p} \quad (1)$$

式中:  $n$  为电机转速,  $f$  为电机的电压频率,  $p$  为磁极对数,  $s$  为滑差率。

通过控制变频器输出电压的频率对电机转速进行自动调节,进而调整水泵机组工作状态,可以使管网水压达到期望压力值并保持稳定。为实现供水泵站变频恒压控制需求,可将泵站控制系统分为两个部分,其一为变频器和电机组成的转速控制部分,另一部分为管道压力控制部分。其中,管道压力控制部分可以分为恒压过程和压力上升过程<sup>[12]</sup>。由此,泵站恒压控制系统的等效模型为:

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) = \frac{K_1}{T_{1s} + 1} \cdot \frac{K_2}{T_{2s} + 1} e^{-\tau s} \cdot K_3 \quad (2)$$

式中:  $G_1(s) = \frac{K_1}{T_{1s} + 1}$  为变频器和电机组成的转速控制部分,  $K_1$  为电机增益,  $T_1$  为电机时间常数;  $G_2(s) = \frac{K_2}{T_{2s} + 1} e^{-\tau s}$  为水泵机组组成的管道压力控制部分,  $K_2$  为压力控制系统增益,  $T_2$  为时间常数,  $\tau$  为滞后常数;  $G_3(s) = K_3$  为系统中其他控制和检测环节,可等效为比例环节。

结合上述控制过程,可以对用户侧供水压力进行控制,并使其稳定在设定压力范围内。对于供水泵站恒压控制的关键点在于控制器计算的控制量是否能对变频器输出电压的频率进行合理调节,而控制器的参数直接影响其控制效果,所以选取合理的控制参数可以提升系统的控制性能。

### 2 基于 PSO-BPNN 的供水泵站 PID 控制

#### 2.1 BPNN-PID 基础框架

PID 控制器由比例、微分和积分 3 个控制模块组成, PID 控制器分为增量型和位置型。由于供水泵站的电机调速控制是实时性很强的快速控制,而增量式 PID 仅计及控制增量,避免积累误差,计算工作量远远小于位置性 PID,其应用也更加广泛<sup>[13]</sup>。因此,本文采用增量式 PID 实现供水泵站恒压控制。增量式 PID 主要通过近几次系统的误差值,根据 PID 参数计算每一采样时刻的控制增量,进而调节控制对象。其中,控制增量计算公式为:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

式中:  $k$  为采样次数,  $\Delta u(k)$  为控制增量;  $u(k)$  和  $u(k-1)$  分别为第  $k$  次采样和第  $(k-1)$  次采样的增量式 PID 计算的控制量;  $e(k)$  是设定输入和实际输出的偏差,即  $e(k) = r_{in}(k) - y_{out}(k)$ ; 同理,  $e(k)$ 、 $e(k-1)$  和  $e(k-2)$  为近三次采样时刻的误差值;  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  分别为比例系数、积分系数和微分系数。

系统的控制效果取决于  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  参数的设定,利用 BPNN 的自学习能力,对这 3 个参数进行自适应整定,可以高效地满足系统控制要求。本文设计的 BPNN 结构

如图 2 所示。

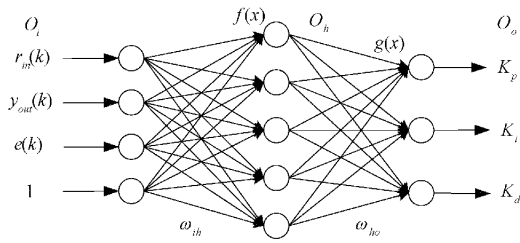


图 2 BPNN 结构

### 1) 输入层和输出层。

在对 PID 系数进行整定的过程中, BPNN 需要获得每次采样的系统设定值、实际输出值及误差值, 以实现 PID 参数值的不断更新, 最终满足控制要求。从而, 这里 BPNN 的输入为:

$$O_i = [r_{in}(k) \quad y_{out}(k) \quad e(k) \quad 1] \quad (4)$$

其中,  $r_{in}(k)$  为设定输入;  $y_{out}(k)$  为实际输出。

为实现对 PID 参数的自适应计算, BPNN 的输出为 PID 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ 。

$$O_o = [K_p \quad K_i \quad K_d] \quad (5)$$

### 2) 激励函数设置。

隐含层激励函数  $f(x)$  采用 Sigmoid 函数<sup>[7]</sup>。对于输出层激励函数  $g(x)$ , 由于输出的 PID 参数为正值, 故本文选用非负的 Sigmoid 函数, 其表达式为:

$$g(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (6)$$

### 3) BPNN 的误差反向传递。

该过程中采用梯度下降法对性能指标函数最小值进行寻优<sup>[7]</sup>。为使系统满足恒压控制需求, 本文选取设定输入与实际输出之间的误差平方值  $E(k)$  作为 BPNN 误差反向传递过程的性能指标函数, 即:

$$E(k) = \frac{1}{2} (r_{in}(k) - y_{out}(k))^2 \quad (7)$$

在误差反向传播过程中, 通过求取  $E(k)$  的最小值来对输入层和隐含层以及隐含层与输入层之间的连接权值进行更新调整<sup>[9]</sup>。

输出层与隐含层之间连接权值的更新公式为:

$$\begin{aligned} \omega_{oh}(k+1) &= \omega_{oh}(k) + \Delta\omega_{oh}(k) \\ \Delta\omega_{oh}(k) &= \eta\delta_o O_h(k) + \alpha\Delta\omega_{oh}(k-1) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\omega_{oh}(k)$  和  $\omega_{oh}(k-1)$  分别为第  $k$  次采样中, 隐含层与输出层的连接权值,  $\Delta\omega_{oh}(k)$  和  $\Delta\omega_{oh}(k-1)$  分别为第  $k$  次和第  $(k-1)$  次采样中隐含层与输出层的权值调整量;  $\eta$  为学习速率;  $\alpha$  为惯性系数;  $O_h(k)$  为第  $k$  次采样时, 隐含层的输出。

$\delta_o$  为输出层误差梯度, 可以影响 BPNN 权值的更新幅度, 在误差反向传播过程具有重要作用。为使 BPNN 计算结果更为合理, 同时考虑 PID 参数对系统的控制作用, 本文定义  $\delta_o$  为:

$$\delta_o = e(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial \Delta y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right) \left(\frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_o(k)}\right) g'[net_o(k)] \quad (9)$$

式中:  $\Delta y(k)$  和  $\Delta u(k)$  分别为第  $k$  次采样中, 实际输出的偏差值和控制增量;  $net_o(k)$  为输出层输出。这里, 使用符号函数  $\operatorname{sgn}(x)$  可以避免  $\Delta u(k)$  过小导致的梯度爆炸情况。

输入层与隐含层之间连接权值的更新公式为:

$$\begin{aligned} \omega_{hi}(k+1) &= \omega_{hi}(k) + \Delta\omega_{hi}(k) \\ \Delta\omega_{hi}(k) &= \eta\delta_i O_i(k) + \alpha\Delta\omega_{hi}(k-1) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\delta_i = f'[net_h(k)] \sum_{o=1}^3 \delta_o \omega_{oh}(k)$$

式中:  $\omega_{hi}(k)$  和  $\omega_{hi}(k-1)$  分别为第  $k$  次采样中, 隐含层与输入层的连接权值,  $\Delta\omega_{hi}(k)$  为第  $k$  次采样中隐含层与输入层的权值调整量。

由上可知, 通过 BPNN 学习能力对 PID 控制器的 3 个控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  进行自适应调整, 对于供水泵站这种时滞的非线性系统具有较好的适应性。然而, 在实际运用中, BPNN 的各层初始权值是随机给定的, 若初始权值选取不合理, 会导致 BPNN 收敛速度过慢, 极易陷入局部最优等问题。针对以上 BPNN 存在的不足, 可采用智能优化算法对其初始权值进行寻优, 进而优化网络训练过程, 提升网络计算效率。

## 2.2 IPSO-BPNN-PID 控制算法

PSO 是一种基于多目标优化的智能启发式算法, 该算法源于对鸟类捕食行为的研究<sup>[11]</sup>, 此算法通过种群中粒子之间的个体信息与社会信息的共享协作, 在搜索空间中寻找最优解。该算法收敛快、精度高、且实现, 故本文采用 PSO 对 BPNN 的初始权值进行寻优。

考虑供水泵站系统存在的非线性的特点, 为实现 BPNN 对 PID 参数高效自适应整定, 对传统 PSO 速度惯性权重线性递减方式进行改进, 提出一种非线性的惯性权重递减方法, 能较好地结合 BPNN 非线性的训练过程, 有利于平衡 PSO 全局以及局部寻优能力, 进一步优化 BPNN, 以提高控制参数的计算效率。

### 1) 改进 PSO 算法

在 PSO 中,  $D$  维空间中随机初始化的每个粒子都具有两个特性, 即速度向量  $V_i$  和位置向量  $X_i$ 。将个体历史最佳位置记为:  $p_{best} = (pt_{i1}, pt_{i2}, \dots, pt_{id})$ 。将全局历史最佳位置记为:  $g_{best} = (gt_{i1}, gt_{i2}, \dots, gt_{id})$ , 其中粒子位置和速度更新公式分别为<sup>[14]</sup>:

$$X_{id}^t = X_{id}^{t-1} + V_{id}^{t-1} \quad (11)$$

$$V_{id}^t = \omega V_{id}^{t-1} + c_1 r_1 (pt_{id} - X_{id}^{t-1}) + c_2 r_2 (gt_{id} - X_{id}^{t-1}) \quad (12)$$

式中:  $\omega$  为速度惯性权重,  $c_1$  和  $c_2$  均为学习因子, 可以调节粒子对自身方向和全局最优方向的搜索步长,  $r_1$  和  $r_2$  为区间  $[0, 1]$  之间的随机数, 以增加粒子搜索的随机性。此外, 为了实现粒子搜索的稳定性, 需要将粒子速度变化空间限

制为  $[-V_{max}, V_{max}]$ 。

一般情况下,粒子在粒子寻优过程早期应当具有较强的全局寻优能力,可以快速精准地确定可行解的大致范围,然后,通过局部寻优,对最优解进一步确定。速度惯性权重  $\omega$  可以调节上一代粒子速度对当前速度更新的影响,因此,可以通过不断更新  $\omega$  对粒子搜索范围进行调节,平衡 PSO 的局部和全局搜索能力<sup>[15]</sup>。通常,  $\omega$  的值越大,粒子的全局搜索能力越强,避免粒子在搜索过程陷入局部最优状况;  $\omega$  的值越小,粒子局部搜索能力越强,有利于算法收敛。

在传统的 PSO 算法中,惯性权重地变化是线性递减的,式(15)为线性递减的惯性权重更新公式:

$$\omega(t) = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{T_{max}} \cdot t \quad (13)$$

式中:  $\omega_{min}$  和  $\omega_{max}$  分别为速度惯性权重的最大值和最小值,  $t$  为当前迭代次数,  $T_{max}$  为最大迭代次数。

在非线性且较为复杂的寻优搜索过程中,线性递减惯性权重的方法并不能有效满足粒子寻优要求。因此,为提高寻优效率,本文提出一种非线性惯性权重递减策略,其更新过程为:

$$\omega(t) = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot (1 - (\frac{t}{T_{max}})^{\lambda}) \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  为权重递减调节因子,本文取  $\lambda = 2.5$ 。

相比于传统的线性递减的惯性权重,在粒子寻优过程中,改进的非线性惯性权重递减策略结合系统特性以及 BPNN 非线性拟合能力,对 PSO 的惯性权重进行调节,可以平衡粒子寻优的局部和全局的搜索能力。

由上,结合 BPNN 训练过程与供水泵站恒压系统均具有非线性特点,将速度惯性权重非线性递减的 IPSO 用于 BPNN 初始权值寻优,再利用优化后的 BPNN 实时自适应调整增量 PID 的 3 个控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ ,提升系统的动态性能和稳定性。IPSO-BPNN-PID 控制算法的原理框图如图 3 所示。

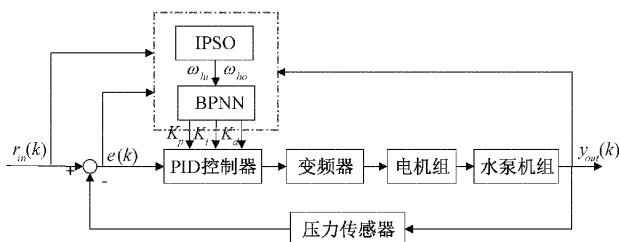


图 3 IPSO-BPNN-PID 控制算法原理结构

2) 算法实现步骤

在原有 BPNN-PID 控制算法的基础上,将本文提出的 IPSO-BPNN 算法对 PID 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  进行自适应调节,算法流程如图 4 所示

具体步骤如下:

(1) 确定 BPNN 的结构以及参数。

根据训练要求和目标,确定隐含层数以及各层的神

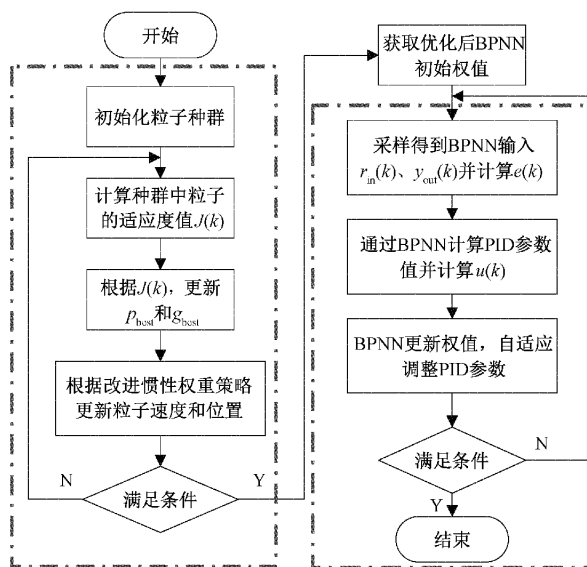


图 4 IPSO-BPNN-PID 控制算法流程

经元节点数;确定网络参数,如学习速率和惯性系数等。

(2) PSO 参数初始化。

确定种群大小,最大迭代次数  $T_{max}$ ,设置学习因子  $c_1$  和  $c_2$ ,生成随机数  $r_1$  和  $r_2$ ,确定适应度函数,即:

$$J(k) = \sum_{n=1}^N |e(k)| \quad (15)$$

(3) PSO 迭代计算

通过计算当前粒子适应度值并将其与个体历史最佳位置和全局最佳位置进行比较。通过改进的非线性递减的速度惯性权重,更新粒子的速度和位置,当达到最大迭代次数或满足预设条件时,将寻优结果作为 BPNN 的初始权值。

(4) BPNN 在线计算 PID 参数

BPNN 在获取了最优初始权值后,通过前向传播训练不断更新 PID 参数,并且通过梯度下降算法对输入层与隐含层的连接权值以及隐含层与输出层的连接权值进行反向更新调整。当满足预设条件时,系统达到期望输出并保持稳定,得到稳定状态的 PID 3 个参数值。

3 实验结果与分析

3.1 实验参数设置

基于 MATLAB 对某供水公司泵站恒压控制系统,进行 IPSO-BPNN-PID 控制算法的仿真实验。以国家管网供水压力服务标准水压 0.14 MPa 为恒压控制目标;设计系统采样时间为 1 s,共有 1 000 个采样点。某供水公司供水泵站变频恒压控制系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{4.4}{(10s + 1)(12s + 1)} e^{-9s} \quad (16)$$

为提高 BPNN 计算 PID 参数的效率,采用一层隐含层,整体网络结构为 3 层,输入层神经节点数为 4,输出层神经节点有  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  3 个,结合经验公式<sup>[16]</sup>并经过



测试,隐含层神经节点数为 5,学习速率  $\eta$  为 0.5,惯性因子  $\alpha$  为 0.02。

对于 IPSO 算法,设定学习因子  $c_1 = c_2 = 1.4945$ ,  $r_1$  和  $r_2$  为区间  $[0,1]$  之间的正态分布随机数。取  $\omega_{\min} = 0.4$ ,  $\omega_{\max} = 0.9$ ,  $T_{\max} = 100$ 。

### 3.2 实验结果及分析

为验证本文算法 (IPSO-BPNN-PID) 在供水泵站系统中的恒压控制性能,设计并进行恒压控制实验,对比并分析本文算法和 BPNN-PID、PSO-BPNN-PID 这 3 种控制算法在恒压控制过程中的动态性能。同时,考虑到供水泵站系统外部工作环境复杂多变,而且系统自身容易受到管道淤堵,泵后管道阀门开度不规范、用水流量变化过大等情况的干扰,针对泵站控制系统中的实际情况,进行输入信号非线性跟随实验和间隙干扰实验,以此来验证本文算法在供水泵站系统中的控制稳定性和抗干扰性。

#### 1) 恒压控制实验

实验中通过阶跃响应模拟水压控制过程,如图 5 所示为 3 种控制算法的恒压控制响应结果,如图 6 所示为本文算法的控制参数整定的过程,即  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  实时整定的过程。

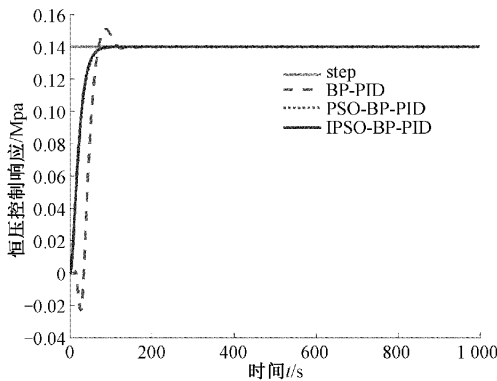


图 5 3 种控制算法阶跃响应对比

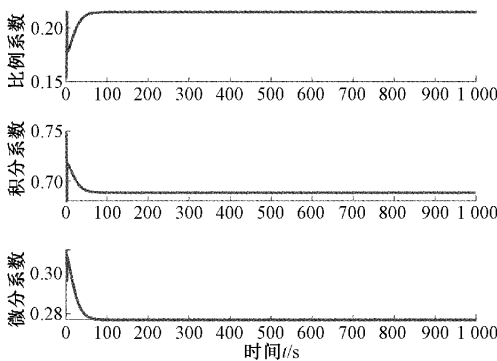


图 6 本文算法控制参数变化曲线

由上述实验结果对比可知,3 种 PID 控制算法都能达到期望水压并保持稳定。其中,本文算法响应平滑且无超调;在调节时间方面,本文算法的调节时间为 69 s,相较于

BPNN-PID、PSO-BPNN-PID 分别缩短 29.6% 和 2.8%。表 1 为 3 种 PID 控制算法的阶跃响应动态性能对比,由此分析可知,本文算法能使系统在满足国家管网供水标准水压 0.14 MPa 的同时,响应速度更快,响应曲线平滑无超调,能够提高系统恒压控制过程的高效性和稳定性。

表 1 3 种控制算法阶跃响应动态性能对比表

控制算法	超调量 $\sigma/\%$	调节时间 $t_s/s$
BPNN-PID	4.6	98
PSO-BPNN-PID	0	71
IPSO-BPNN-PID	0	69

#### 2) 非线性输入信号跟随实验

为验证本文算法的对输入信号的跟随能力,在恒压控制 500 s 时,对系统输入信号附加一个幅值大小为 0.001,时长为 40 s 的正弦非线性信号,对比分析 3 种控制算法在非线信号作用期间,系统响应对输入信号的跟随情况以及非线性信号结束作用后,系统的调节时间。如图 7 所示为 3 种 PID 控制算法的输入非线性信号跟随响应对比。

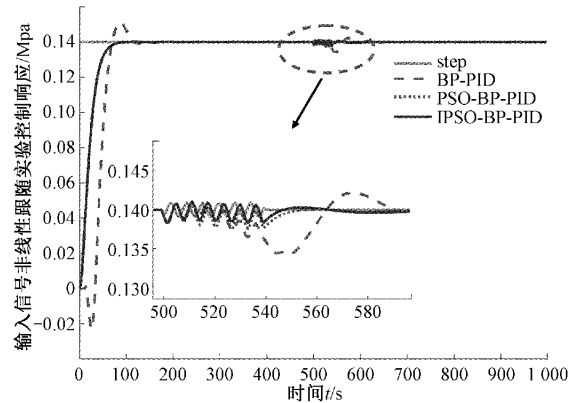


图 7 3 种控制算法的非线性干扰跟随对比

表 2 为非线性输入实验中 3 种控制算法在非线信号作用期间性能对比。由表 2 所示,本文算法在非线信号作用期间,实际输出和输入之间的误差平均值为 0.001 1,相较于另两种算法,分别减小了 31.3% 和 15.4%;在非线信号作用结束后,本文算法的调节时间为 17 s,相比于另两种算法分别缩短了 63.8% 和 10.5%。因此,本文算法在非线信号作用期间,实际输出与给定输入的误差更小,在供水泵站变频恒压控制过程中,系统对于输入信号具有更好的稳定跟随能力,而且恢复稳定状态的速度更快。

表 2 非线性输入实验中 3 种控制算法性能对比

控制算法	误差平均值	调节时间 $t_s/s$
BPNN-PID	0.001 6	47
PSO-BPNN-PID	0.001 3	19
IPSO-BPNN-PID	0.001 1	17

## 3) 间隙干扰实验

为验证本文算法的抗干扰性,在恒压控制 500 s 时,对系统施加一个幅值为 0.01,时长为 1 s 的阶跃信号干扰,对比分析 3 种 PID 控制算法在干扰后的控制性能。如图 8 所示为 3 种 PID 控制算法的间隙干扰响应,如图 9 所示为本文算法的 PID 参数变化。

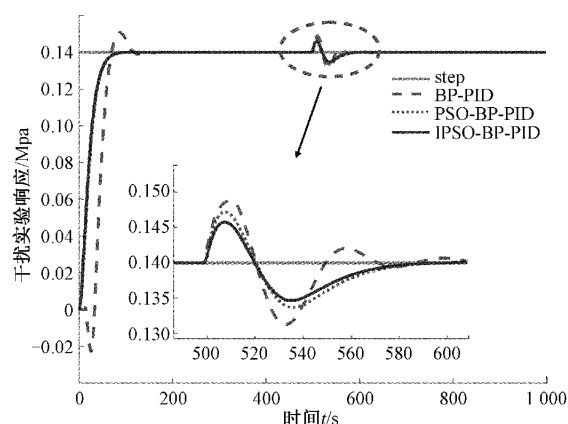


图 8 3 种控制算法的间隙干扰响应对比

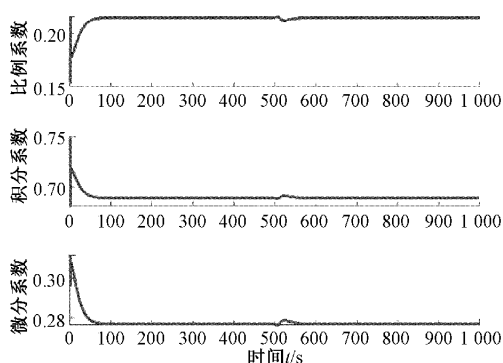


图 9 间隙干扰实验控制参数变化

如图 8 所示,3 种 PID 控制算法的响应在受到干扰后,均产生了超调,系统在一定时间内能够恢复稳定。表 3 为间隙干扰后,3 种控制算法动态性能实验对比数据。如表 3 所示,本文算法干扰后的超调量为 4.11%,相比于 BPNN-PID 和 PSO-BPNN-PID,本文算法在系统受到干扰后产生的振荡更小,超调量分别减少了 34.6% 和 19.9%;另一方面,本文算法的干扰后调节时间为 63 s,相比于 BPNN-PID 和 PSO-BPNN-PID,调节时间分别缩短了 7.3% 和 1.6%,系统恢复稳定的速度更快。这说明对于供水泵站变频恒压控制过程中存在的干扰情况,本文算法具有更稳定的控制性能和抗干扰性,可以达到提升系统稳定性的预期目标。

表 3 3 种控制算法间隙干扰后动态性能对比

控制算法	超调量 $\sigma/\%$	调节时间 $t_s/s$
BPNN-PID	6.29	68
PSO-BPNN-PID	5.13	64
IPSO-BPNN-PID	4.11	63

通过开展以上恒压控制、输入非线性信号跟随实验和间隙干扰实验,可以发现:本文算法可以更高效稳定地实现泵站系统恒压供水的工作要求。在输入非线性信号跟随实验中,本文算法对输入信号的跟随性能较好,系统可以较快速恢复稳定。同时,本文算法对于泵站系统中存在的干扰具有较为良好的稳定控制能力。

## 4) 讨论

通过分析可知,IPSO-BPNN-PID 算法可以较好地满足供水泵站系统的控制需求,并提高系统稳定性和高效性。然而,在恒压控制中,从系统运行到满足标准水压的调节时间为 69 s,相比于 PSO-BPNN-PID 缩短 2.8%。因此对于一些实时性要求较高的系统,本文算法在系统调节时间方面存在优化空间。另一方面,供水泵站系统实际工作环境复杂多变,本文通过阶跃信号等典型干扰信号模拟系统干扰情况并进行实验分析,验证了 IPSO-BPNN-PID 算法可提高系统抗干扰性,但是对于高频干扰信号,本文算法的抗干扰能力较为有限。

## 4 结 论

基于当前供水泵站变频恒压控制系统特性,为提高系统控制过程的动态性能和稳定性,本文提出了一种改进 PSO-BPNN-PID 的自适应控制算法,开展恒压控制、间隙干扰、非线性信号跟随实验进行验证,结果显示本文算法的超调量、调节时间均有不同程度的减少,体现了良好的动态性能和抗干扰性能。本文算法可提高供水泵站变频恒压控制的高效性和稳定性,为供水泵站变频恒压控制器的设计提供了一种较为科学的参考。

## 参考文献

- [1] 谭昭,陈红勋,马峥,等. 基于多目标遗传算法(NSGA-II)的供水泵站运行优化研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 181-185.
- [2] 黄思,徐征南,张聪,等. 基于 Flowmaster 软件的恒压泵系统流量调控的能耗分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 221-224.
- [3] 杨辉,王洋洋,陆荣秀. 变频恒压供水系统启动过程优化[J]. 控制工程, 2016, 23(11): 1639-1645.
- [4] 白蕾,孟娇娇,辛旗. 基于 PLC 与变频器的恒压供水系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(4): 61-65.
- [5] 朱嵘涛,武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017, 414(7): 121-126.
- [6] 汤跃,张新鹏,黄志攀,等. 离心泵变压供水系统控制模型辨识的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 189-193.
- [7] HUANG G, YUAN X, SHI K, et al. A BP-PID controller-based multi-model control system for lateral stability of distributed drive electric vehicle[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019(356): 7290-7311.

- [8] 许永强,王玲花,刘旭阳,等. 基于 BP 神经网络 PID 控制在水轮机调节中应用的研究[J]. 水力发电, 2016, 42(11): 80-83,94.
- [9] MENG Z, ZHANG L, LI H, et al. Design and application of liquid fertilizer pH regulation controller based on BP-PID-Smith predictive compensation algorithm[J]. Appl. Sci., 2022, 12(12): 6162.
- [10] 李航,杜璠,胡晓兵. 改进的 BP 神经网络 PID 控制器在气体浓度控制中的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2020, 57(6): 1103-1109.
- [11] 张涛,王亚刚,李开言. 聚合酶链式反应仪的 IGWO-BP 神经网络 PID 控制[J/OL]. 控制工程:1-8[2023-08-24].
- [12] 高雅,陈忠孝,秦刚,等. 模糊自适应 PID 楼宇变频恒压供水控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(11): 40-43.
- [13] 文波,孟令军,张晓春,等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12): 113-116.
- [14] 郭文忠,陈国龙,陈振. 离散粒子群优化算法研究综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 631-638.
- [15] 许荣斌,王业国,王福田,等. 基于改进 PSO-BP 算法的快递业务量预测[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(7): 1871-1879.
- [16] 郁美霞,董刚,胥如迅,等. 基于 BP 神经网络的精密时基源校准预测模型[J]. 中国测试,2023,49(10): 194-200.

#### 作者简介

余梦龙,硕士研究生,主要研究方向为智能控制。

E-mail:2110296043@email.szu.edu.cn

何莉(通信作者),博士,教授,主要研究方向为智能检测技术及自动化装置。

E-mail:heli@szu.edu.cn