

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.030

# 基于 SOA 优化 PID 控制参数的智能灌溉控制策略研究

许景辉<sup>1,2</sup> 王雷<sup>2</sup> 谭小强<sup>2</sup> 王一琛<sup>3</sup> 赵钟声<sup>2</sup> 邵明烨<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为解决智能灌溉系统中水泵运行的不稳定问题, 基于人群搜索优化算法 (Seeker optimization algorithm, SOA) 实现了 PID (Proportion integration differentiation) 参数的自动优化。该优化算法能够有效解决智能灌溉系统水泵控制中的非线性、时变性和滞后性等问题。为验证 SOA 优化 PID 控制的实际效果, 与 PSO (Particle swarm optimization) 算法和 GA (Genetic algorithms) 算法优化的 PID 控制进行比较。仿真实验结果表明, 基于 SOA 优化的 PID 控制响应时间短、超调量小、稳态过程没有振荡。因此, 适用于智能灌溉系统中的水泵控制。

**关键词:** 智能灌溉; PID 控制; SOA 优化算法; 水泵控制

中图分类号: S275; TP2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0261-07

OSID:



## Application of PID Control Based on SOA Optimization in Intelligent Irrigation System

XU Jinghui<sup>1,2</sup> WANG Lei<sup>2</sup> TAN Xiaoqiang<sup>2</sup> WANG Yichen<sup>3</sup> ZHAO Zhongsheng<sup>2</sup> SHAO Mingye<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The control of water pump water supply is an important part of the intelligent irrigation control system. The water supply in the water supply process is beneficial to the development of crop roots and the absorption of minerals in the soil within the optimal control range. In the intelligent irrigation control, due to the nonlinear, time-varying and hysteresis problems of the pump control, the traditional proportion integration differentiation (PID) control is difficult to achieve good control effects. In order to solve the instability problem of pump control in intelligent irrigation system, based on the traditional PID control algorithm, the seeker optimization algorithm (SOA) was used to optimize PID control. The results showed that the optimal control algorithm can effectively solve the problems of nonlinearity, time-varying and hysteresis in the control of intelligent irrigation pumps. In order to verify the actual effect of SOA optimization PID control, it was compared with particle swarm optimization (PSO) optimized PID control and genetic algorithms (GA) optimized PID control. The experimental simulation results showed that the PID control based on SOA optimization had the shortest response time, smallest overshoot, and no oscillation in the steady state process. Therefore, it was suitable for pump control in intelligent irrigation systems.

**Key words:** intelligent irrigation; PID control; SOA; pump control

## 0 引言

中国是农业大国, 农业灌溉用水占据水资源的

绝大部分, 但传统的灌溉方式造成了水资源的大量浪费。智能灌溉系统通过水泵自动供水设施将作物所需的水分按需供给, 促进作物根系生长<sup>[1-3]</sup>。水

收稿日期: 2019-08-01 修回日期: 2019-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)和陕西水利科技计划项目(2014slkj-18)

作者简介: 许景辉(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业电气化与农业智能化检测研究, E-mail: x36936@163.com

泵供水过程中,给水量在最优控制范围内有利于作物根系的发育及土壤中矿物质的吸收<sup>[4]</sup>。因此,按照作物需水进行水泵供水精确控制是实现智能灌溉的关键。

水泵控制系统存在非线性、时变性和滞后性等问题,这将影响智能灌溉系统的整体运行效率。目前,国内外主要采用PID控制和模糊控制策略来实现作物智能灌溉,通过调整相应的参数来实现相关设备控制器的精度,从而取得较好的控制效果<sup>[5-8]</sup>。PID控制是灌溉控制系统普遍采用的控制方法<sup>[9]</sup>,其控制算法简单、参数调整方便、鲁棒性好、可靠性高,适用于各种工况<sup>[10-11]</sup>,但PID控制存在过渡过程时间和超调量之间的矛盾。PID控制的效果主要取决于参数的整定<sup>[12-13]</sup>,不同的控制对象及控制参数对控制系统产生的影响不同。李俊勇等<sup>[14]</sup>提出采用改进的遗传算法和模糊控制技术相结合,通过对PID参数整定的优化,使控制器具有良好的控制效果。江金龙等<sup>[15]</sup>提出一种基于遗传算法和直接搜索策略的PID参数整定方法,研究表明,该方法提高了搜索精度和收敛精度。李开霞等<sup>[10]</sup>提出一种通过实时整定PID参数的自适应PID控制策略,该策略可以应用于多功能除湿机的温控,具有较好的稳定性。但PID控制策略需要凭借经验和反复调试来整定PID参数,工作费时、费力,并且将传统的PID控制用于现代智能灌溉系统中的水泵控制,其控制精度达不到要求。因此,需要根据灌溉水机电系统的传递函数自适应PID参数,以达到目前智能灌溉系统中精准控制、精准灌溉的要求。

本文以智能灌溉系统中水泵机电系统为被控对象,选取特定工作条件下的水泵供水传递函数,基于人群搜索优化算法(Seeker optimization algorithm, SOA)实现灌溉控制系统的PID控制参数优化,分析其响应时间及稳定状态。将粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)和遗传算法(Genetic algorithm, GA)与SOA进行比较,分析3种优化策略在水泵供水控制中的效果,以实现精度高、稳定性好的水泵供水控制,为实现精准的智能灌溉系统提供技术支持。

## 1 基于SOA优化的PID控制系统设计

### 1.1 PID控制

在模拟控制系统中,PID控制器是一种线性控制器<sup>[16-17]</sup>,系统由控制器和被控对象组成,其模拟控制系统框图如图1所示。

PID控制器由比例环节(Proportional)、积分环节(Integral)和微分环节(Differential)组成<sup>[18]</sup>,PID

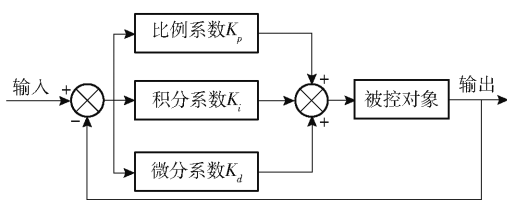


图1 PID控制系统框图

Fig. 1 PID control system block diagram

的控制规律表示为

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

将式(1)写成传递函数的形式

$$G(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

式中  $T_i$ ——积分时间常数  
 $T_d$ ——微分时间常数  
 $e(t)$ ——系统误差  
 $u(t)$ ——控制输出  
 $G(s)$ ——系统传递函数  
 $E(s)$ ——输出函数  
 $U(s)$ ——输入函数  
 $s$ ——复数变量

对于PID控制器而言,当采样周期比较短时,可采用PID的离散化处理,即可通过离散化将连续系统直接转换为差分方程。为此,用一阶差分式代替微商,用求和代替积分,用矩形积分代替连续积分的近似值,即可求出PID控制器的离散方程。公式为

$$\Delta u(t) = K_p \left( \Delta e(k) + \frac{T_0}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_i} \Delta^2 e(k) \right) = K_p \left( \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d \Delta^2 e(k) \right) \quad (3)$$

其中  $K_i = K_p \frac{T_0}{T_i}$   $K_d = K_p \frac{T_d}{T_i}$

式中  $T_0$ ——采样周期

$e(k)$ —— $k$ 时刻控制偏差

虽然传统PID控制工作稳定且控制结构简单,但对于一个具有非线性、时变性和滞后性的智能灌溉系统,其 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 3个参数调整复杂,为了满足全局最优调控和缩短过渡的时长,需要通过PID优化算法以提高其控制效果<sup>[19-21]</sup>。

### 1.2 SOA优化PID控制

#### 1.2.1 SOA算法

人群搜索优化算法(SOA)是进化算法研究领域的一种新型群体智能算法,该算法立足传统的直接搜索算法,将搜索队伍作为种群,以各搜索者所处位置作为候选解,通过模仿人类在进行搜索行为时对位置和方向等的推理判断完成问题的最优求解,采用SOA优化的PID参数整定,具有收敛快、鲁棒性好和稳定性高等特点<sup>[22]</sup>。

SOA 算法具体描述为<sup>[23]</sup>：假定在维度为  $D$  的空间中有  $S$  个搜寻个体，则个体  $i$  所处的位置为

$$\mathbf{X}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{iD}]^T \quad (4)$$

由于 PID 控制器由 3 个主要的控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  决定，则设定 SOA 优化算法的个体维度为 3，能够实现 PID 控制器参数进行优化整定。适应度函数是搜寻者优化算法与控制系统结合的纽带，指导算法按控制目标要求不断进化。为了获取满意的过程动态特性，采用误差绝对值的时间积分性能指标作为最小目标函数。同时，为了防止控制能量过大，引入控制输入平方项，即目标函数为

$$\min f = \begin{cases} \int_0^\infty (\zeta_1 |e(t)| + \zeta_2 u^2(t)) dt \\ (e(t) \geq 0) \\ \int_0^\infty (\zeta_1 |e(t)| + \zeta_2 u^2(t) + \zeta_3 |e(t)|) dt \\ (e(t) < 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$ ——权值系数， $\zeta_3 \gg \zeta_1$

为了避免超调，采用了惩罚控制，通过对比试验，式(5)权值系数  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$  一般取 0.999、0.001、100 可实现较好控制效果。

SOA 的不确定推理行为是利用模糊系统的逼近能力，模拟人的智能搜索行为，用以建立感知(目标函数值)和行为(步长)之间的联系，搜索步长表示为

$$\alpha_{ij} = \delta_{ij} \sqrt{-\ln u_{ij}} \quad (6)$$

式中  $\alpha_{ij}$ —— $j$  维搜索空间的搜索步长

$\delta_{ij}$ ——高斯隶属函数参数

$u_{ij}$ —— $j$  维搜索空间目标函数值  $i$  的隶属度

通过对人的利己行为、利他行为和预动行为的分析和建模，确定搜索方向为

$$\mathbf{d}_i(t) = \text{sign}(\omega \mathbf{d}_{i,pro} + \varphi_1 \mathbf{d}_{i,ego} + \varphi_2 \mathbf{d}_{i,alt}) \quad (7)$$

式中  $\mathbf{d}_{i,pro}$ ——搜寻个体预动方向

$\mathbf{d}_{i,ego}$ ——搜寻个体利己方向

$\mathbf{d}_{i,alt}$ ——搜寻个体利他方向

$\omega$ ——惯性权值，随进化代数的增加从 0.9 线性递减至 0.1

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ——0~1 之间常数

### 1.2.2 PID 控制器的 SOA 算法优化设计

基于 SOA 算法优化的 PID 控制流程如下：①初始化每个搜索者的个体位置，系统随机产生初始位置矩阵。②计算搜索个体的适应度。③对当前每个搜索者个体位置与其历史最佳位置进行比较，选择和保留最优个体位置进行更新。④对种群历史最优位置与当前个体最优位置进行比较，若当前搜索个体更好则对种群历史最优位置进行更新替换。⑤如

果未达到结束条件，返回步骤②，否则结束循环。

依据上述算法原理设计基于 SOA 优化 PID 控制的水泵供水控制系统，如图 2 所示。

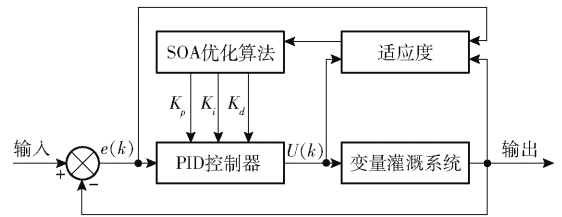


图 2 基于 SOA 优化 PID 控制的智能灌溉控制系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of intelligent irrigation control system based on SOA optimized PID control

## 2 被控对象模型

智能灌溉系统中水泵供水系统可认为是一种压力不断变化的稳压供水系统，稳压供水系统是通过调节变频器改变水泵的供水量，从而达到水压稳定的目的<sup>[24]</sup>。国内也有提出变压供水，其机理是从恒压供水演变而来，分为压力上升阶段和恒压阶段，压力上升阶段是一阶惯性环节，恒压阶段为纯滞后环节，则供水系统模型可表示<sup>[25-26]</sup>为

$$G_1 = \frac{p_0}{n_p} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s} \quad (8)$$

式中  $T_1$ ——供水系统的惯性时间常数，s

$k_1$ ——供水系统的增益

$\tau$ ——供水系统的时滞常数，s

$n_p$ ——传递函数输入，即供水系统中离心泵的转速

$p_0$ ——传递函数输出，即供水系统的出口压力

$G_1$ ——供水系统传递函数

变频器和水泵电动机可近似为等效时间常数  $T_2$  的一阶惯性环节，可表示为

$$G_2 = \frac{n_m}{f_c} = \frac{k_2}{T_2 s + 1} \quad (9)$$

式中  $T_2$ ——调速系统的惯性时间常数，s

$k_2$ ——调速系统的增益

$f_c$ ——传递函数输入，即供水系统中变频器的输入频率

$n_m$ ——传递函数输出，即供水系统中电动机的转速

$G_2$ ——调速系统传递函数

系统中其他控制及检测环节与供水系统的时间常数相比可以忽略，可以看作一个比例环节

$$G_3 = k_3 \quad (10)$$

式中  $G_3$ ——其他系统传递函数

$k_3$ ——其他系统增益

设定智能灌溉系统中供水系统采用离心泵供水,则该系统电机的转速等于离心泵的转速,从而整个供水系统的模型可表示为上述3个环节的串联模型,可表示<sup>[25]</sup>为

$$G = \frac{P_0}{f_c} = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s} \quad (11)$$

其中  $k = k_1 k_2 k_3$

式中  $k$ ——系统的总增益

$G$ ——系统传递函数

$T_1$  主要由用户的数量决定,  $T_2$  主要由变频器加速时间常数和电动机的自身特性决定,  $\tau$  由管网系统的最不利点与用户的距离和系统中水的平均流速决定。

蒙蕊蕊等<sup>[27]</sup>通过模型辨识对离心泵供水做了大量实验,辨识出不同工况下离心泵的传递函数。本次仿真传递函数选用其研究中初始频率为30 Hz、目标频率为40 Hz且球阀打开数为1工况下的传递函数。在一定范围降频、参数变化小等工况中可以认为是一阶惯性加时滞的模型,但当系统处于升频或参数变化较大、较快的过程中,系统模型变为二阶惯性加时滞模型,模型结构较复杂。本文选择系统处于升频状态,因此系统模型为二阶惯性加时滞,模型传递函数为

$$G = \frac{9.12e^{-0.26s}}{(0.59s + 1)(0.35s + 1)} = \frac{9.12}{0.2065s^2 + 0.94s + 1} e^{-0.26s} \quad (12)$$

### 3 仿真测试与结果分析

为了验证 SOA 优化 PID 控制算法的优越性,采用 PSO 优化算法和 GA 优化算法进行 Matlab 仿真对比。分别编写基于 SOA、PSO 和 GA 优化下的 PID 控制算法代码,对以上选取的水泵控制系统进行仿真实验,设该系统种群规模为30,最大迭代次数为100次,最大隶属度为0.9500,最小隶属度为0.0111,权重最大值为0.9,权重最小值为0.1,维数为3,得 PSO、GA、SOA 优化适应度函数控制曲线、系统阶跃响应输出曲线和系统阶跃响应输出误差曲线分别如图3~5所示。

由图3可知,在3种优化算法寻找适应度函数的最优适应度时,PSO优化算法寻找最优适应度最快,仅需要2次迭代就找出了该适应度函数的最优适应度,SOA优化算法次之,在第8次迭代完成后找到该适应度函数的最优适应度,而GA优化算法最差,在第74次迭代后找出了该适应度函数的最优适

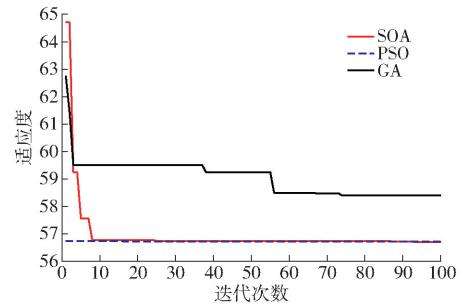


图3 适应度函数控制曲线

Fig. 3 Fitness function control curves

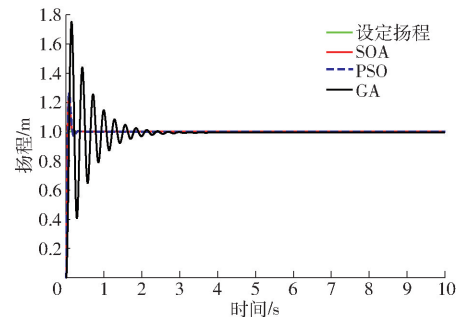


图4 SOA、PSO、GA系统阶跃响应输出曲线

Fig. 4 Step response output curves of SOA, PSO and GA systems

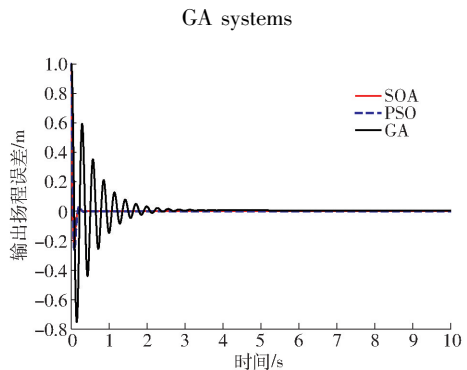


图5 SOA、PSO、GA系统阶跃响应输出误差曲线

Fig. 5 Step response output error curves of SOA, PSO and GA systems

GA systems

度。由此可见,SOA和PSO优化算法在确定适应度函数的最优适应度速度较快且稳定性较好,而GA优化算法速度慢且稳定性较差。由图4可知,GA优化算法到达平稳所需的时间为3.50 s,最大超调量为0.75 m,而SOA和PSO优化算法达到平稳所需时间均小于0.50 s、最大超调量均小于1.3 m,且上升时间均小于GA优化算法的上升时间,因此,SOA和PSO优化算法相对收敛快、控制精度高,而GA优化算法上升用时及收敛用时较长,超调量较大。由图4可知,SOA优化算法与PSO优化算法的PID控制系统相比,上升时间减少了0.01 s,超调量降低了0.06 m。表明SOA优化的PID智能灌溉控制系统具有更好的控制效果和鲁棒性。由图5可知,GA优化算法误差最大,最大误差为0.72 m,而SOA和PSO优化算法的最大误差均不大于0.27 m,

误差相对较小。SAO 优化算法的最大误差为 0.22 m,而 PSO 优化算法的最大误差为 0.27 m。因此,SAO 优化算法误差更小。综上所述,智能灌溉系统中的水泵供水控制系统基于 SOA 优化的 PID 控制效果最优,可应用于智能灌溉系统控制。

## 4 基于 SPWM 的智能灌溉机电控制系统仿真模型验证

### 4.1 SPWM 控制原理

SPWM 控制技术旨在控制变频器的输出电压来满足交流调速系统的需要。其基本控制思想是等效原则,即用一定数量宽度不等(半个周期内,两侧波形窄,中间波形宽)幅值相等的脉冲矩形波来等效正弦波,如图 6 所示。SPWM 波形与正弦波等效的具体内容是将正弦波曲线的一个周期等分成若干份,每一段小周期内的正弦波曲线所围面积,用一系列高度相等,宽度中心与每一小段周期的 1/2 处相重合的矩形脉冲的面积来等效,就可以得到需要等效的一系列 SPWM 脉冲波。

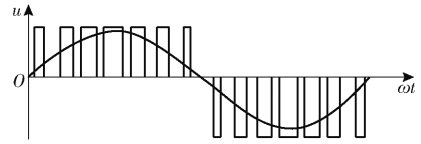


图 6 SPWM 脉冲波形

Fig. 6 SPWM pulse waveform

### 4.2 灌溉控制系统模型建立

运用 Matlab 中 Step 模块设置转速给定值,并与实际转速进行比较得到转速偏差。利用异步电动机转速与频率的关系将转速偏差转换成频率偏差,经 PID 控制器得到系统控制量。由于实际情况中频率控制难以瞬时变化,采用 Rate Limiter 模块实现控制频率上升和下降,为了在 0.25 s 内完成 0 ~ 50 Hz 的加速,Rate Limiter 的参数可分别为 200 和 -200。恒压频比控制 V/F 曲线则由 1-D Lookup Table 模块来实现。上述模块设置参数后与 SPWM 控制器模型连接就构成了智能灌溉控制系统模型。将主电路、水泵模型、灌溉控制系统连接得到图 7 所示变量灌溉控制系统仿真模型。

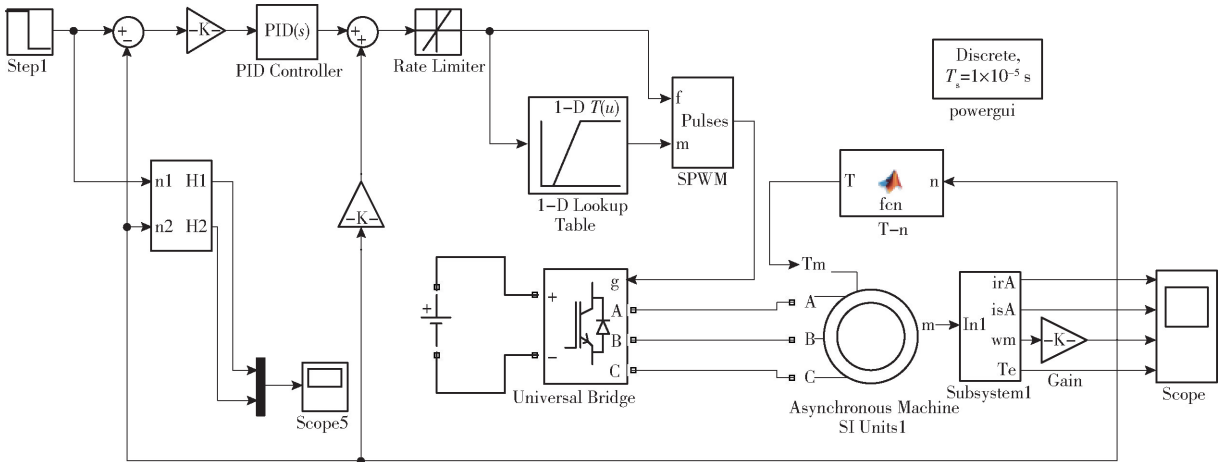


图 7 基于 SPWM 的智能灌溉控制系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of intelligent irrigation control system based on SPWM

设置转速给定值为 1 400 r/min (0 ~ 1 s) 和 1 200 r/min (1 ~ 2 s),相当于水泵给定扬程为 23.25 m (0 ~ 1 s) 和 17.08 m (1 ~ 2 s)。系统 PID 参数经传统人工调整可以得到图 8 所示的水泵出口压力变化曲线。系统 PID 参数经 SOA 优化调整则可得到图 9 所示曲线。

从图 8、9 可以看出,灌溉系统的 PID 控制策略通过 SOA 优化后,其参数较人工调整具有很好的控制效果。在变量灌溉系统压力波动较大时,其控制压力的超调量很小,利于变量灌溉机电系统的稳定运行。

## 5 结论

(1) 基于 SOA 算法优化的 PID 控制在水泵供水

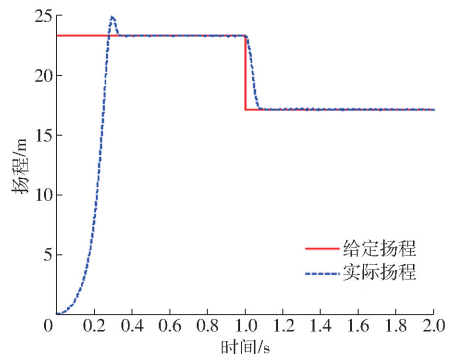


图 8 传统人工调节 PID 参数的水泵出口扬程跟踪曲线

Fig. 8 Pump outlet head tracking curves of traditional manual adjustment PID parameters

控制中调节时间短、超调量小,稳态特性与动态响应特性均最优,通过 SOA 算法可以实现智能灌溉控制

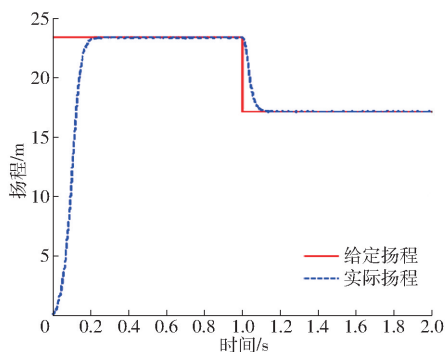


图9 SOA优化PID参数的水泵出口扬程跟踪曲线

Fig.9 Pump outlet curves of SOA optimized PID parameters

系统中的最优控制策略。

(2) SOA 算法在优化过程中,适应度和粒子群数量的调整可有效提高 PID 数值优化效果,能在一定程度上解决传统 PID 控制在智能灌溉系统中水泵供水控制系统的非线性、时变性和滞后性问题。

(3) 仿真验证结果表明,基于 SOA 算法优化的 PID 控制稳定性及动态性能较好,可以很好地满足水泵供水控制系统的自动控制要求,可应用于实际智能灌溉系统。

## 参 考 文 献

- [1] 袁洪波,王海华,庞树杰,等. 日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 159-165.  
YUAN Hongbo, WANG Haihua, PANG Shujie, et al. Design and experiment of closed culture system for solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 159-165. (in Chinese)
- [2] 魏永霞,何双红,魏永华. 控制灌溉条件下水肥耦合对水稻产量及其构成因子的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 98-102.  
WEI Yongxia, HE Shuanghong, WEI Yonghua. Influence of water fertilizer coupling on rice yield and compensation under the condition of water control irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 98-102. (in Chinese)
- [3] 周博,周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 211-216.  
ZHOU Bo, ZHOU Jianbin. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 211-216. (in Chinese)
- [4] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3594-3603.  
SONG Mengya, LI Zhongpei, LIU Ming, et al. Effects of mixtures of different organic materials on soil nutrient content and soil biochemical characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3594-3603. (in Chinese)
- [5] 彭炫,周建平,许燕,等. 基于差分进化算法的水肥配比控制系统设计[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 207-210.  
PENG Xuan, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Design of water and fertilizer ratio control system based on differential evolution algorithm[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 207-210. (in Chinese)
- [6] 李帅帅,李莉,穆永航,等. 基于 Fuzzy-Smith 控制器的营养液 pH 值调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 347-352.  
LI Shuaishuai, LI Li, MU Yonghang, et al. pH value control system of nutrient solution based on Fuzzy-Smith controller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 347-352. [http://www.j-csam.org/jesam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2017s053&flag=1](http://www.j-csam.org/jesam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s053&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.053. (in Chinese)
- [7] WANG Xiuqing, YOU Guodong, YANG Shifeng. Fuzzy control model study on precision irrigation system for water stress in crops[J]. Journal of Computers, 2011, 6(5): 955-962.
- [8] CHEN S H, CHOU J H, LI J. Optimal grey-fuzzy controller design for a constant turning force system[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(3): 343-355.
- [9] DOMINGUES J, VALERIO D, COSTA J S D. Rule-based fractional control of an irrigation canal[J]. Journal of Computational and Nonlinear, 2011, 6(2): 24503.
- [10] 李开霞,张金波,曹爱华. 一种实用的自校正 PID 控制器设计与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(9): 167-170.  
LI Kaixia, ZHANG Jinbo, CAO Aihua. Design and simulation of an useful self-tuning PID controller[J]. Computer Simulation, 2008, 25(9): 167-170. (in Chinese)
- [11] 欧阳惠斌,阳武娇. PID 参数整定法的仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(7): 323-325.  
OUYANG Huibin, YANG Wujiao. Simulation of PID parameters tuning[J]. Computer Simulation, 2007, 24(7): 323-325. (in Chinese)
- [12] 应明峰,鞠全勇,高峰. 基于粒子群优化的 PID 控制器设计与应用[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 283-287.  
YING Mingfeng, JU Quanyong, GAO Feng. Design and application of PID controller based on particle swarm optimization[J]. Computer Simulation, 2011, 28(11): 283-287. (in Chinese)
- [13] 牛芎洁,王玉洁,唐剑. 基于遗传算法的 PID 控制器参数优化研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(11): 180-182.

- NIU Xiangjie, WANG Yujie, TANG Jian. Optimization parameters of PID controller parameters based on genetic algorithm [J]. Computer Simulation, 2010, 27(11): 180-182. (in Chinese)
- [14] 李俊勇,田作华,钱华新. 一种改进遗传算法在抽油机节能器中的应用[J]. 计算机仿真, 2006,23(9): 172-174.  
LI Junyong, TIAN Zuohua, QIAN Huaxin. Application of an improved genetic algorithm in the energy-saving controller for pump unit[J]. Computer Simulation, 2006,23(9): 172-174. (in Chinese)
- [15] 江金龙,薛云灿,杨启文. 基于遗传算法和直接搜索策略的PID整定研究[J]. 计算机仿真, 2005,22(12): 139-142.  
JIANG Jinlong, XUE Yuncao, YANG Qiwen. Combined algorithm for PID tuning based on genetic algorithm and direct search [J]. Computer Simulation, 2005,22(12): 139-142. (in Chinese)
- [16] 李嵩,周建平,许燕. 基于PSO优化Fuzzy-PID精量灌溉控制系统设计[J]. 节水灌溉, 2019(3): 90-93.  
LI Wei, ZHOU Jianping, XU Yan. Optimization of Fuzzy-PID precision irrigation control system design based on PSO[J]. Water Saving Irrigation, 2019(3): 90-93. (in Chinese)
- [17] SCHAEFER C F, KIRA A, SHIVA K, et al. PID: the pathway interaction database[J]. Nucleic Acids Research, 2008, 37: 674-679.
- [18] 於沈刚,马明舟,岳雪峰,等. 模糊PID智能灌溉控制器的设计及MATLAB仿真[J]. 节水灌溉, 2018(5): 86-89.  
YU Shengang, MA Mingzhou, YUE Xuefeng, et al. Design and MATLAB simulation of intelligent irrigation controller based on fuzzy PID algorithm[J]. Water Saving Irrigation, 2018(5): 86-89. (in Chinese)
- [19] 张瀚中,曹江涛,邵鹏飞,等. 基于WSNs的温室大棚智能灌溉控制系统设计[J]. 控制工程, 2019, 26(1): 108-113.  
ZHANG Hanzhong, CAO Jiangtao, SHAO Pengfei, et al. Research on WSNs-based intelligent water saving irrigation control system for greenhouse[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1): 108-113. (in Chinese)
- [20] 邵鹏飞,曹江涛,桑红,等. Fuzzy-PID复合控制在温室节水灌溉中的应用[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(8): 144-147.  
SHAO Pengfei, CAO Jiangtao, SANG Hong, et al. Application of Fuzzy-PID compound control in greenhouse water saving irrigation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(8): 144-147. (in Chinese)
- [21] 李建军,许燕,张冠,等. 基于BP神经网络预测和模糊控制的灌溉控制器设计[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(5): 150-154.  
LI Jianjun, XU Yan, ZHANG Guan, et al. Optimizational design of irrigation controller based on BP neural network prediction and fuzzy control[J]. Machine Design & Research, 2015, 31(5): 150-154. (in Chinese)
- [22] 余胜威,曹中清. 基于人群搜索算法的PID控制器参数优化[J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 347-350.  
YU Shengwei, CAO Zhongqing. Optimization parameters of PID controller parameters based on seeker optimization algorithm [J]. Computer Simulation, 2014, 31(9): 347-350. (in Chinese)
- [23] 陈黎卿,胡冬宝,陈无畏. 基于人群搜索算法的四驱汽车扭矩分配控制策略[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 369-376.  
CHEN Liqing, HU Dongbao, CHEN Wuwei. Control strategy and experiment of torque distribution for 4WD vehicle based on SOA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 369-376. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151150&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151150&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.050. (in Chinese)
- [24] 张强,李宏峰,王海舰,等. 基于模糊PID的综采面降尘喷雾恒压供水系统[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 80-85.  
ZHANG Qiang, LI Hongfeng, WANG Haijian, et al. Constant pressure water-supplying system based on fuzzy PID for dust-reducing spray at fully mechanized coalface[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(2): 80-85. (in Chinese)
- [25] 孔繁余,何玉洋,邵飞,等. 转柱泵瞬时流量的理论推导及数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 29-33.  
KONG Fanyu, HE Yuyang, SHAO Fei, et al. Theoretical derivation and numerical simulation of instantaneous flow rate for pillar pump[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2014, 35(1): 29-33. (in Chinese)
- [26] 丁周伟. 泵站恒压供水系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
- [27] 蒙蕊蕊,汤玲迪,汤跃,等. 供水系统模型辨识与动态特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(12): 1040-1044.  
MENG Ruirui, TANG Lingdi, TANG Yue, et al. Model identification and dynamic characteristics analysis of water supply system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(12): 1040-1044. (in Chinese)