

# 基于广义回归神经网络的灌溉系统首部多用户配水快速 PID 控制

张 千, 魏正英<sup>\*</sup>, 张育斌, 张 磊, 贾维兵, 魏浩然

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 针对多用户配水状态下灌区流量、压力需求变化范围大, 传统流量、压力控制响应速度慢等问题, 建立适用于多用户灌区配水的灌溉系统首部控制技术。该研究通过分析供水系统流量、压力调节方式, 提出了流量、压力 PID (Proportion Integration Differentiation) 耦合调节方法, 建立以电动阀开度为流量控制量、变频器频率为压力控制量对流量和压力进行调控的灌溉首部控制系统。为了减少系统的调节时间, 提高系统的运行效率, 采用广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network, GRNN) 建立流量、压力和电动阀控制模拟量、变频器控制模拟量间的预测模型, 形成神经网络 PID 控制模型 (GRNN\_PID), 并进行模型精度和控制精度验证。GRNN 训练结果显示, 变频器控制模拟量的相对误差为 0.11%~3.86%, 电动阀控制模拟量相对误差为 0.09%~5.74%, 模型精度较高。使用 3 个调节过程模拟 3 个用户的需求行为对模型进行验证, 结果表明, GRNN\_PID 模型 3 个过程的调节时间分别为 11.6、10.7 和 7.2 s, PID 模型 3 个过程的调节时间分别为 31.7、29.6 和 16.9 s, GRNN\_PID 模型大幅减少了系统的调节时间, 提高了系统的运行效率; 分别计算了 2 种模型的控制精度, GRNN\_PID 调节方法和传统 PID 调节方法的稳态流量和压力误差都在 1%以内, 最大超调量为 8%, 控制精度较高但相差不大, 表明 GRNN 是从策略上加速系统调节速度, 其本身并没有对 PID 的参数进行调整, 因此对系统的控制精度影响不大。研究可为灌溉系统流量压力快速控制提供参考。

**关键词:** 流量; 压力; 神经网络; 控制; 耦合; PID 调节

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.012

中图分类号: TP272

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-11-0103-07

张千, 魏正英, 张育斌, 等. 基于广义回归神经网络的灌溉系统首部多用户配水快速 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 103-109. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.012 <http://www.tcsae.org>

Zhang Qian, Wei Zhengying, Zhang Yubin, et al. Rapid-response PID control technology based on generalized regression neural network for multi-user water distribution of irrigation system head[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 103-109. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.012 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

流量和压力是灌溉系统中 2 个重要的控制量, 决定着灌溉过程能否满足灌溉需求<sup>[1-2]</sup>。当前中国农业灌溉多为中、小型工程, 在灌溉管理上缺少有效的节水灌溉规划<sup>[3-5]</sup>。多用户灌溉系统中, 不同用户需水量往往不同, 同时受天气、气候和园区规划等因素影响, 灌溉园区总可用水量不确定。双重不确定因素的存在, 导致不同用户对灌溉水量和水压的要求差别较大<sup>[6-7]</sup>。为满足不同用户的需求, 提高灌溉效率, 保证供水系统安全、稳定运行, 灌溉系统要能够针对压力、流量需求变化, 迅速、准确做出反映, 这对系统的控制提出了较高的要求。首部作为灌溉系统的动力源, 保证其相应快速和控制精确是满足上述要求的关键。

传统灌溉首部水泵多为恒速泵, 无法满足不断变化的流量与压力需求<sup>[8]</sup>, 且会造成较大的资源浪费。而在变

频控制系统中, 由于流量与压力的相互影响, 很难针对其中一个进行单独调节。为此, 国内外专家学者开展了较多研究。Caba 等<sup>[9]</sup>建立了由多台并联离心泵、1 个蓄能器和 1 个连接负载组成的增压系统的非线性动力学模型, 设计了多泵系统的非线性控制器, 提出的控制方案保证了系统的线性特性; Fernando<sup>[10]</sup>通过对 2 种不同的流量调节技术在泵系统和成本控制中的改进研究, 提出使用变频调速结合节流阀调速实现对流量和压力的控制, 提高了控制性能和能源利用率; 李宝<sup>[11]</sup>设计了流量标准装置的变频调速系统, 开发了串级数字 PID 控制算法, 在对比稳流和稳压 2 种控制方案的优缺点的基础上, 开展 PID 流量稳定性试验研究, 获得了较好的压力、流量稳定性; 刘永等<sup>[12]</sup>为了实现流量和压力的耦合控制, 设计了流量、压力闭环 PID 控制系统, 削弱了流量与压力的相互干扰, 提高了系统的控制精度; 刘汉忠等<sup>[13]</sup>提出了模糊 PID 自适应算法, 解决了流量、压力耦合调节过程中控制效果较差问题, 实现了流量、压力的稳定控制。

首部系统流量、压力针对需求变化的响应速度是灌溉系统中要考虑的另一重要因素, 其在很大程度上影响灌溉的效率; 另一方面, 当流量、压力发生骤变时, 系统调节速度慢会导致管路压力暴增, 危及系统运行安全。刘艳雄等<sup>[14]</sup>使用遗传算法和非线性二次规划算法优化

收稿日期: 2020-01-15 修订日期: 2020-05-03

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFD0201504); 国家科技支撑计划项目 (2015BAD24B00)

作者简介: 张千, 研究方向为智能灌溉。Email: 761153410@qq.com

※通信作者: 魏正英, 教授, 博士生导师, 研究方向为微流体器件设计与制造等。Email: zywei@mail.xjtu.edu.cn

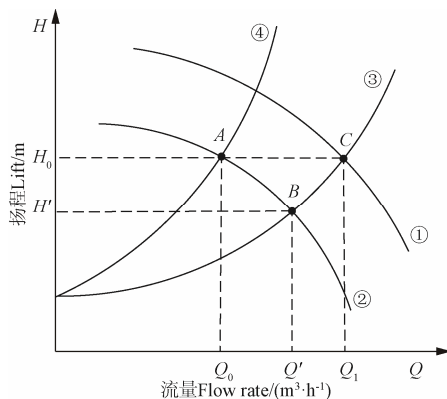
PID 参数, 获得了液压快速缸的高响应速度; 刘心漪<sup>[15]</sup>采用灰色预测算法对快速电源控制系统中的反馈量进行预测, 实现了控制的超前调节; Mohammadi 等<sup>[16]</sup>提出了基于神经网络的反馈控制器, 以状态误差作为神经网络的输入, 在线更新 PID 控制器的增益, 实现系统的精确控制与快速响应; Yadav 等<sup>[17]</sup>设计并实现了基于多目标遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 的混合动力汽车 PID、模糊 PID (Fuzzy Proportional Integral Derivative, FPID) 和自校正模糊 PID (Improved Self-tuning Fuzzy Proportional Integral Derivative, ISTF-PID) 控制器, 结果表明 GA 能够提升 PID 的控制性能, 并且 ISTF-PID 性能最好。这些方法都在一定程度上提高了控制系统的响应时间, 但多以 PID 参数调整为手段, 很少从被控量与其控制量之间的关系入手。

本研究提出一种基于神经网络结合 PID 调节的灌溉系统首部流量、压力快速控制系统。该系统采用神经网络拟合流量、压力及其控制量之间的关系, 通过拟合模型快速求得目标流量、压力所需的控制量值, 直接对相应执行元件进行控制, 之后再通过 PID 对流量和压力进行微调, 以此实现流量和压力的快速控制, 以期为多用户灌溉系统首部流量压力快速控制提供参考。

## 1 方法

### 1.1 压力和流量耦合调节分析

供水系统中, 压力和流量是衡量系统供水能力的重要指标, 它们相互之间存在一定的联系。图 1 为管道供水特性曲线, 其由水泵扬程特性曲线和管道阻力特性曲线组成。



注: ①和②为流量扬程曲线, ③和④为管阻特性曲线。

Note: ① and ② are flow rate-lift curves; ③ and ④ are curves of pipeline resistance.

图 1 供水系统特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of water supply system

扬程指水泵能够扬水的高度, 其与压力之间的关系可由式 (1) 表示为

$$P = H\rho g \quad (1)$$

式中  $P$  为压力, kPa;  $H$  为扬程, m;  $\rho$  为管道液体密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。由式 (1) 可知, 管道供水系统压力  $P$  与  $H$  为成正比关系, 因此图 1 可以反映流量与压力间的内在联系<sup>[18]</sup>。

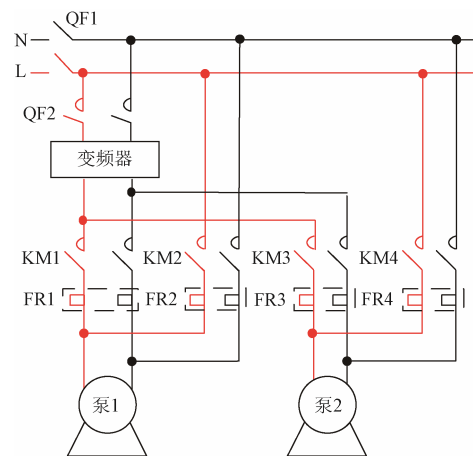
水泵扬程特性曲线是一簇流量扬程曲线, 水泵转速不同, 水泵的流量扬程曲线不同, 如图 1 曲线①、②所

示, 且曲线 1 转速大于曲线 2 转速; 管阻特性曲线也是一簇流量扬程曲线, 曲线所表示的范围因管道截面不同而有所变化, 如图 1 曲线③、④所示, 曲线③代表的管道截面大于曲线④。若水泵转速和阀门开度为定值, 水泵扬程特性曲线与管阻特性曲线交于一点, 供水系统流量和扬程被唯一确定, 如图 1 中 A、B、C 3 点所示, 若起始时, 系统工作在 A 点, 流量、扬程分别为  $Q_0$ 、 $H_0$ , 当阀门开度增大时, 管道阻力特性曲线由④变为③, 系统工作在 B 点, 流量由  $Q_0$  增加到  $Q'$ , 扬程由  $H_0$  降为  $H'$ , 为了维持恒定的供水扬程, 增加水泵转速使其扬程特性曲线由②变为①, 此时系统工作在 C 点, 扬程回升至  $H_0$ , 流量变为  $Q_1$ 。基于此, 可以通过调节水泵转速和阀门开度调节系统流量和扬程, 也即调节系统流量和压力, 达到稳压调流的目的。

### 1.2 灌溉系统首部稳压调流供水试验平台设计

#### 1.2.1 泵水方式

为了满足流量、压力变化范围大的工况, 现有灌溉首部多采用提高水泵功率的方式以实现流量、压力大范围调节。然而这种方式往往会带来很多问题<sup>[19]</sup>, 1) 前后 2 个用户间用水需求差距过大时, 首部的响应速度会很慢, 影响灌溉效率; 当出现从大压力、大流量需求变为小流量、小压力需求这种极端情况时, 系统响应过慢有可能导致管网压力陡增, 对元器件甚至灌溉系统造成严重危害; 2) 大功率意味着大启动电流, 对电源容量要求高, 同时消耗的能源也高; 3) 维修不便, 当水泵出现问题时, 整个首部系统便陷入停摆状态, 严重影响灌溉进程。使用多台并联小功率水泵作为供水源可以很好地解决前述问题, 当面对流量、压力变化较大的情况时, 可以通过开启或者关闭 1 台水泵以实现流量和压力的快速控制; 1 台水泵出现问题时也不必停止供水, 而且多台水泵可以由 1 台变频器控制, 通过水泵的变频-工频转换实现首部流量、压力大范围无极调节, 并不会增加投资<sup>[20]</sup>。多泵控制变频-工频转换电路如下图 2 所示。



注: L 为火线; N 为零线; QF1 和 QF2 为空气开关; KM1~KM4 为接触器; FR1~FR4 为热继电器。

Note: L is live wire; N is neutral wire; QF1 and QF2 are air switches; KM1~KM4 are contactors; FR1~FR4 are thermal relays.

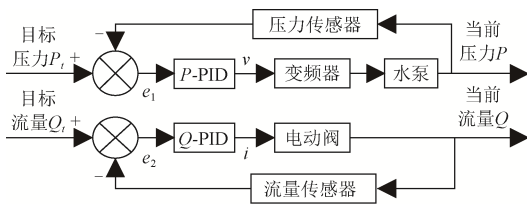
图 2 多泵控制变频-工频转换主电路图

Fig.2 Frequency conversion-power frequency conversion main circuit diagram of multi-pump control

系统工作时，通过控制接触器的开闭实现对水泵的变频、工频转换控制。当水流量需求较小时，接触器 KM1 闭合，KM2、KM3、KM4 断开，系统使用变频器对水泵 1 进行变频调节，以满足流量、压力需求；当需水量增大、一台水泵无法满足需水要求时，接触器 KM1 断开，KM2 闭合，水泵 1 转为工频运行，同时 KM3 闭合，水泵 2 转为变频调速运行，满足系统较大水量和压力需求。

### 1.2.2 控制方式

本研究选用型号为 APAX-5580 的 PAC 控制器对系统进行控制，该控制器融合了工业电脑 (Personal computer, PC) 和可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 的功能，内置 win7 系统，可运行 Matlab 等大型桌面软件，实现高级算法的实时在线运行；具有串口、网口、USB 等多种接口，配合扩展底板和扩展模块可实现控制功能，以 Codesys 为控制软件开发平台，使用 IEC61131-3 国际标准语言开发控制程序。在系统控制中，使用 PID 实现流量和压力的耦合控制，其框图如图 3 所示。压力传感器和流量传感器分别采集压力和流量数据，通过 RS485 总线传输到 PAC 串口，Codesys 从串口读取传感器数据并将流量、压力误差值反馈给 PID 控制器，完成流量和压力的闭环控制。



注： $e_1$  为  $P_t$  和  $P$  的误差； $e_2$  为  $Q_t$  和  $Q$  的误差； $P$ -PID 和  $Q$ -PID 分别为用于调节压力的 PID 控制器和用于调节流量的 PID 控制器； $v$  为控制变频器需要的电压模拟量； $i$  为控制电动阀需要的电流模拟量。  
 Note:  $e_1$  is the error of  $P_t$  and  $P$ ;  $e_2$  is the error of  $Q_t$  and  $Q$ ;  $P$ -PID and  $Q$ -PID are PID controller used for regulating pressure and flow rate, respectively;  $v$  is voltage analog required to control converter;  $i$  is current analog required to control electric valve.

图 3 压力-流量耦合调节 PID 控制框图

Fig.3 PID control diagram of pressure-flow rate coupling regulation

### 1.2.3 系统组成

变频调速恒压泵组供水系统硬件由 PAC 控制器、变频器、电动阀、多个水泵、压力传感器、流量传感器和电磁阀等组成，其如图 4 所示。

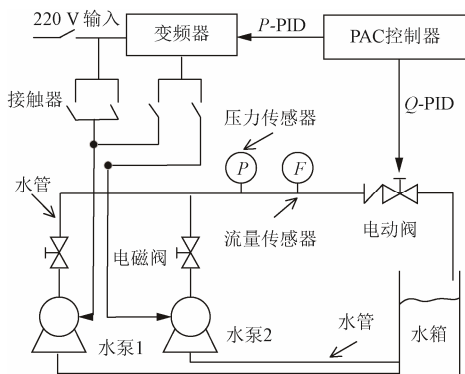


图 4 供水系统框图

Fig.4 Water supply system diagram

系统工作时，首先获取目标压力和流量值，由外部

输入指定。压力传感器和流量传感器实时将管路压力和流量信息传递给 PAC 控制器，控制器经过 PID 计算后得出变频器频率和电动阀门开度信息，通过对水泵转速和阀门开度控制完成对流量和压力的耦合调节，根据需水量大小调节水泵投入台数及水泵的变频-工频转换调节完成大范围水量调节。系统工作流程图 5 所示。

### 1.3 基于神经网络优化 PID 的流量和压力快速控制

由图 1 可知，首部供水系统水泵转速、管道阀门开度与流量、压力之间存在一一对应关系，当水泵转速和阀门开度确定时，流量与压力也随之确定，因此若能找出他们之间的关系式，则可快速地由目标流量和压力确定水泵转速和阀门开度，以提高系统的调节速度。然而通过数学推导确定这种对应关系的公式较为困难，采用神经网络可以很好地解决这个问题。利用系统工作时流量、压力、水泵转速和阀门开度的有限历史数据，建立神经网络拟合模型，从而拟合全范围内流量、压力与水泵转速、阀门开度的对应关系。

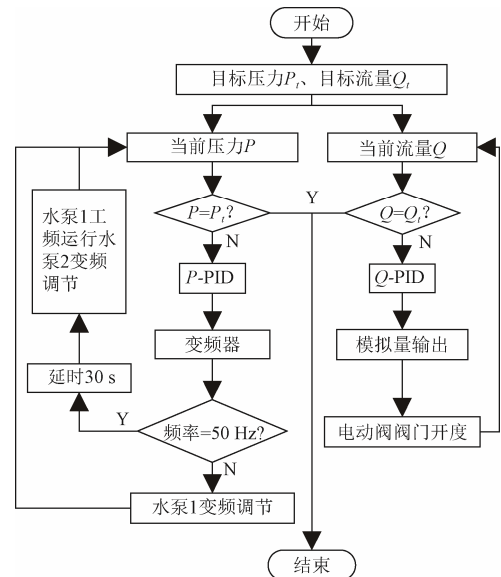


图 5 供水系统工作流程图

Fig.5 Working flow chart of water supply system

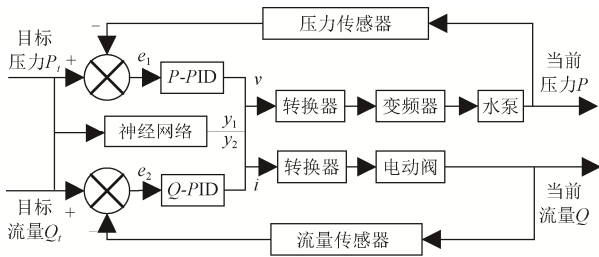
### 1.3.1 调节原理

考虑到系统工作中，对流量、压力调节起根本作用的是控制变频器频率的电压模拟量  $V$  ( $0 \sim 10 \text{ V}$ ) 和控制电动阀开度的电流模拟量  $I$  ( $4 \sim 20 \text{ mA}$ )，提出建立流量、压力与  $I$ 、 $V$  之间的神经网络预测模型。利用目标流量值和目标压力值使用训练好的神经网络计算出  $I$  和  $V$  的预测值  $y_1$  和  $y_2$ ，并将其作为初始值直接改变变频器频率和电动阀开度，使系统的流量和压力迅速接近其目标值，之后再使用 PID 控制器依据目标流量  $Q_t$ 、目标压力  $P_t$  与当前流量  $Q$ 、当前压力  $P$  之间的差值  $e_1$ 、 $e_2$  计算出  $I$  和  $V$  的调节值  $i$  和  $v$  对流量和压力进行微调，直至满足控制精度需求。神经网络结合 PID 控制框图如图 6 所示。

### 1.3.2 广义回归神经网络

广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network, GRNN) 因其强大的拟合能力而广泛应用于解决小样本数据量和非线性条件下的数据拟合问题，同时由于

其鲁棒性高，容错性强，具有很好的不稳定数据处理能力，适用于对流量和压力这种具有波动的样本进行拟合。GRNN 网络结构较为简单，使用时只需要使用交叉验证优化其使用的径向基函数的平滑参数就可以得到很好的结果。本研究中使用 Matlab 神经网络工具箱建立 GRNN 模型，利用试验数据对模型进行训练，使用 Matlab OPC 工具箱与控制系统进行通讯<sup>[21-22]</sup>，获取目标流量和目标压力值并利用训练完成的 GRNN 计算所需的控制量值，再通过 OPC 协议下发到控制系统中，实现神经网络的实时在线应用。



注：y<sub>1</sub> 为神经网络对 v 的预测值；y<sub>2</sub> 为神经网络对 i 的预测值。  
Note: y<sub>1</sub> and y<sub>2</sub> are predicted values of v and i by neural network, respectively.

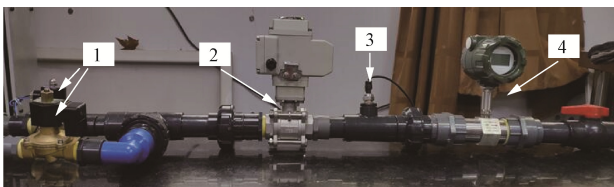
图 6 神经网络 PID 控制框图

Fig.6 Neural network PID control block diagram

以系统运行中压力 P 和流量 Q 为输入，以对应的用于调节变频器频率的电压模拟量 V 和用于调节电动阀开度的电流模拟量 I 为输出，建立广义递归神经网络模型。由于控制系统使用 1 台变频器控制 2 个水泵，不论系统中有多少个水泵在工作，变频器的电压模拟量始终都在 0~10 V 范围内，因此需要将水泵投入使用数量也加入到模型中。而投入使用的水泵数量是离散量，其数值对系统运行起着很大的作用，在使用神经网络进行预测的过程中，如果该数值出现差错则会对系统的运行产生非常大的影响，所以本系统中，将投入使用水泵数量和用于调节变频器频率的电压模拟量 V 合二为一，即当工作的水泵个数为 2 时，程序中实际使用的数据是当前变频器模拟量数值加 10，输出的结果中，变频器模拟量数值减 10 后再输出给变频器，这样既可以反映实际问题，又能避免出现较大差错。

1.4 案例分析

在西安交通大学节水工程实验室搭建的多泵并联供水试验台进行试验，试验台实物如图 7 所示。



1.电磁阀 2.电动阀 3.压力传感器 4.流量传感器  
1.Solenoid valve 2.Electric valve 3.Pressure sensor 4.Flow sensor

图 7 多泵并联供水试验台

Fig.7 Multi-pump parallel water supply experiment platform

压力传感器和流量传感器测量主管路压力和流量值，由于本系统设计时主要针对目标为温室多用户系统，1 个温室即为 1 个用户，也即 1 个轮灌小区，因此压力和流量传感器测量的是用户压力和流量。

选择 2 个型号相同的离心泵作为供水动力源，试验主管

道口径为 DN40。在 0~0.6 MPa 压力范围内，每隔 0.04 MPa 选 1 个压力点，在 2~7 m<sup>3</sup>/h 流量范围内，每隔 0.5 m<sup>3</sup>/h 选 1 个流量点进行试验，采集系统工作稳定后的流量 P、压力 Q、水泵运行台数、变频器控制模拟量 V 和电动阀控制模拟量 I 作为原始数据，获得 150 组数据结果如表 1 所示。

表 1 流量压力控制试验数据

Table 1 Data of flow and pressure control test

序号 No.	压力 Pressure /MPa	流量 Flow rate /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	水泵数 Number of pumps	模拟量 Analog values	
				电压 Voltage/V	电流 Currency/mA
1	0.04	2.5	1	5.63	8.07
2	0.04	3.0	1	6.32	8.34
3	0.04	3.5	1	6.58	8.46
4	0.04	4.0	2	7.36	8.83
5	0.04	4.5	2	7.57	9.05
6	0.04	5.0	2	8.14	9.42
7	0.04	5.5	2	8.56	10.73
8	0.04	6.0	2	8.94	11.26
...	...	...	...	...	...
148	0.60	6.0	2	9.36	12.21
149	0.60	6.5	2	9.42	11.36
150	0.60	7.0	2	9.41	10.53

1.5 神经网络预测分析

将试验数据按照 4 : 1 的比例分成训练数据和测试数据对神经网络进行训练和测试，模型训练过程中采用 K 折交叉验证对模型进行调优，本研究选定 K 为 10，最终得到广义回归神经网络的最优径向基函数平滑参数为 0.3。考虑到神经网络模型的拟合结果误差对控制系统影响最大，使用相对误差作为模型的评价指标。测试数据 V 和 I 的相对误差如图 8 所示。由图 8 可知，变频器控制模拟量的相对误差为 0.11%~3.86%，电动阀控制模拟量相对误差为 0.09%~5.74%，预测精度较高，满足使用需求。

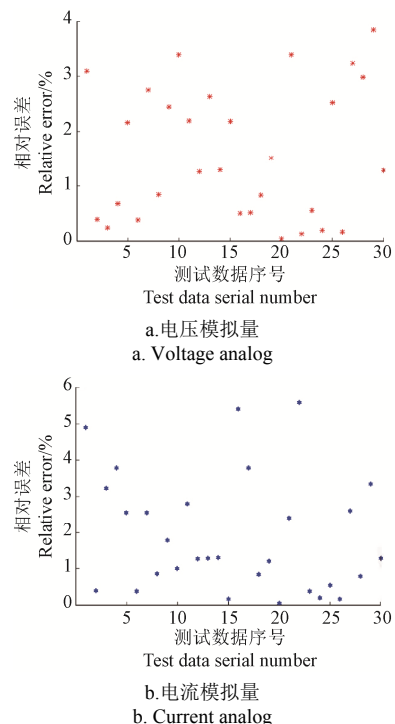


图 8 测试数据的相对误差

Fig.8 Relative errors of test data

### 2 结果与分析

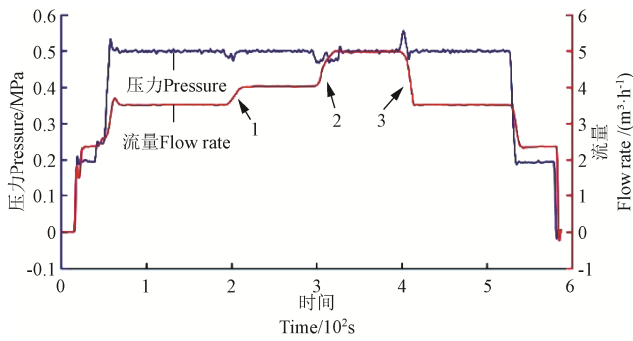
将训练好的广义神经网络应用于 PID 控制系统中，组成 GRNN\_PID 控制模型，采用 3 个调节过程模拟 3 个用户的需水行为验证 PID 和 GRNN\_PID 对首部压力和流量的控制精度和调节时间，3 个用户的流量、水压需求分别如表 2 所示。

表 2 用户流量压力需求

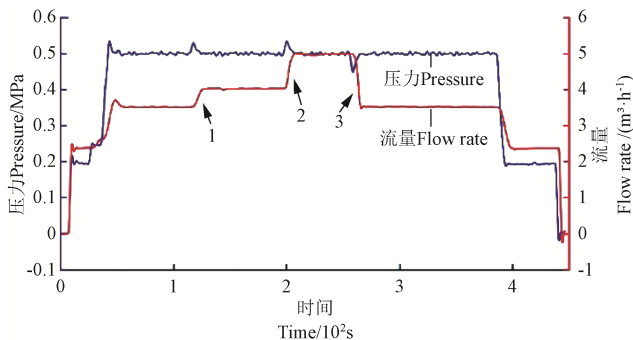
Table 2 Flow rate and pressure demands of different users

用户编号 No. of user	压力 Pressure/MPa	流量 Flow rate/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	0.5	3.5
2	0.5	5.0
3	0.5	3.5

首先调节过程 1，设定压力为 0.5 MPa，流量为 3.5 m<sup>3</sup>/h，水泵 1 变频启动，变频器达到工频后压力仍未达到目标压力，此时流量为 2.37 m<sup>3</sup>/h。延迟 30 s 后，水泵 1 转为工频运行，水泵 2 变频启动，管路压力达到 0.5 Pa，流量由 2.37 m<sup>3</sup>/h 增加到 3.5 m<sup>3</sup>/h 并保持不变；调节过程 2，压力保持不变，流量设定为 5 m<sup>3</sup>/h 并保持不变；调节过程 3，压力继续保持不变，流量设定为 3.5 m<sup>3</sup>/h。最终 2 种控制方法的试验结果如图 9 所示。



a. PID 调节  
a. PID adjustment



b. GRNN\_PID 调节  
b. GRNN\_PID adjustment

注：1~3 为用户编号。  
Note: 1-3 is No. of User.

图 9 2 种调节方法对比

Fig.9 Comparison of results by two adjustment methods

分别计算 2 种调节方法的调节时间得结果如表 3 所示。由表 3 可知，GRNN\_PID 3 个调节过程的调节时间分别为 11.6、10.7 和 7.2 s，PID 相应调节时间分别为 31.7、29.6 和 16.9 s，GRNN\_PID 在 3 个调节过程中的调节时间

均少于 PID 调节，大大提高了系统的响应速度。

表 3 2 种调节方式的调节时间

Table 3 Adjustment time of two adjustment methods s

调节方式 Adjustment methods	用户编号 No. of user		
	1	2	3
PID	31.7	29.6	16.9
GRNN+PID	11.6	10.7	7.2

分析 2 种方法控制精度得结果如表 4 所示。由表 4 可知，2 种调节方法管路压力稳态误差均保持在 1%以内，PID 调节最大超调量为 8%，GRNN 结合 PID 调节最大超调量为 7.4%；管路流量稳态误差均在 1%以内，控制精度较高。

表 4 2 种调节方式的控制精度

Table 4 Control accuracy of two adjustment methods

调节方式 Adjustment methods	流量稳态误差 Flow steady-state error/%	压力稳态误差 Pressure steady-state error/%	最大超调量 Max pressure overshoot/%
PID	1	1	8
GRNN+PID	1	1	7.4

同时由表 4 还可以得出两者控制精度相差不大的结论，这是因为神经网络只是建立了流量、压力及其对应控制量之间的关系式，能够从目标流量和压力推算出所需要的控制量的值，从而从策略上加快系统的调节速度，提高灌溉效率，但其本身并没有改变 PID 的参数，因此对系统的控制精度影响不大。

### 3 结论

灌溉系统首部流量和压力控制关系到灌溉系统的稳定性和安全性，本文以加速灌溉系统首部流量、压力调节为目标，设计了多用户首部流量和压力调节系统，实现了灌溉调节的自动化、快速化，保证了系统运行的安全可靠，对灌溉技术的应用和发展具有参考意义。

1) 分析了灌溉首部供水特性曲线，得出流量、压力耦合调节原理，提出使用电动阀和变频器对首部流量和压力进行调控，建立流量、压力 PID (Proportion Integration Differentiation) 耦合调节方法，并设计首部供水试验平台。

2) 针对传统 PID 调节速度慢问题，提出使用神经网络结合加速系统控制。利用试验数据使用广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network, GRNN) 对流量、压力及其控制量之间的关系进行拟合，GRNN 的测试结果显示，其对电动阀控制模拟量和变频器控制模拟量的预测的相对误差分别小于 5.74% 和 3.86%，预测精度较高。将训练好的模型应用于控制系统中并进行试验，结果表明，神经网络结合 PID 调节方法和传统 PID 调节方法相比，流量和压力调节时间均减少，大幅提高了系统的调节速度。

#### [参 考 文 献]

[1] 崔昊杰, 郭萍, 李茉. 基于不确定性的区间分式规划灌区优化配水模型[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(3): 111-121.  
Cui Haojie, Guo Ping, Li Mo. Interval fractional programming optimization model for irrigation water

- allocation under uncertainty[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(3): 111-121. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张志政, 王毅, 矫亚涛. 管道灌溉流量控制模型研究[J]. 节水灌溉, 2009(1): 41-43.  
Zhang Zhizheng, Wang Yi, Jiao Yatao. Study on pipe flux control model[J]. Water Saving Irrigation, 2009(1): 41-43. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张颖丽, 刘元英, 姜海. 大中型灌区信息化技术研究与应用[J]. 江苏水利, 2019(10): 61-64.  
Zhang Yingli, Liu Yuanying, Jiang Hai. Research and application of information in large and medium-sized irrigation areas[J]. Jiangsu Water Resources, 2019(10): 61-64. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张勇刚. 水利灌区管理工作中的问题及对策[J]. 科技创新与应用, 2016(29): 218.
- [5] Singh A. Irrigation planning and management through optimization modelling[J]. Water Resources Management, 2014, 28(1): 1-14.
- [6] 付玉娟, 蔡焕杰. 基于机会约束规划模型的灌溉管网不确定优化研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 219-224.  
Fu Yujuan, Cai Huanjie. Uncertain optimal design of irrigation pipe network with chance-constrained programming[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(5): 219-224. (in Chinese with English abstract)224.
- [7] 马建琴, 陈哲, 刘蕾. 农业多水源灌溉实时优化配置[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 211-214.  
Ma Jianqin, Chen Zhe, Liu Lei. Real-time optimization of agricultural multi-water irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(7): 211-214. (in Chinese with English abstract)
- [8] 田云, 史洁, 金东琦. PLC 变频调速节能灌溉系统的设计[J]. 农机使用与维修, 2014(5): 13-16.  
Tian Yun, Shi Jie, Jin Dongqi. Design of PLC frequency conversion and speed adjusting energy-saving in irrigation system[J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2014(5): 13-16. (in Chinese with English abstract)
- [9] Caba S, Lepper M, Liu S. Nonlinear controller and estimator design for multi-Pump systems[C]: IEEE Conference on Control Technology and Applications: IEEE, 2018.
- [10] Fernando. Pump systems performance impacts multiple bottom lines: Engineering[J]. Engineering and Mining Journal, 2010: 56-61.
- [11] 李宝. 水流量标准装置变频调速稳压系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Li Bao. Research on Pressure Stabilization System of Water Flow Standard Facility Based on Frequency Conversion[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘永, 谷立臣, 杨彬, 等. 液压系统流量、压力闭环控制实验研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(7): 23-25.  
Liu Yong, Gu Lichen, Yang Bin, et al. Experimental study on closed loop control of flow and pressure of hydraulic system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(7): 23-25. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘汉忠, 官元红. 模糊 PID 自适应算法在流量压力控制系统中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(5): 567-569.  
Liu Hanzhong, Guan Yuanhong. Application of fuzzy PID adaptive algorithm in flow-Pressure control system[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(5): 567-569. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘艳雄, 李杨康, 华林, 等. 基于遗传算法精神机快速缸液压伺服系统设计及 PID 控制优化[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2017, 41(1): 52-56.  
Liu Yanxiong, Li Yangkang, Hua Lin, et al. Rapidly cylinder hydraulic servo system design and optimization of PID control based on genetic algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2017, 41(1): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘心漪. EAST 快速控制电源灰色 PID 预测研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.  
Liu Xinyi. The Study of EAST Fast Control Power Supply Grey Prediction and PID Control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [16] Mohammadi A, Ryu J. Neural network-based PID compensation for nonlinear systems: Ball-on-plate example[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2020, 8(1): 178-188.
- [17] Yadav A K, Gaur P. An optimized and improved STF-PID speed control of throttle controlled HEV[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(9): 3749-3760.
- [18] 祁增慧. 基于 PLC 控制的城市恒压供水系统[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
Qi Zenghui. Pressure Constant City Water Supply System Based on PLC Control[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [19] 汤健, 陈玮. 多台水泵并联的最优化方法[J]. 信息技术, 2015(6): 42-46.  
Tang Jian, Chen Wei. The optimal control method of muti-pumps in parallel[J]. Information Technology, 2015(6): 42-46. (in Chinese with English abstract)
- [20] Abdelsalam Ahmed, Basma Moharam, Essam Rashad. Power saving of multi pump-motor systems using variable speed drives[C]. Twentieth International Middle East Power Systems Conference. Egypt: Cairo University, 2018.
- [21] 黄双成, 李志伟. OPC 技术下 MATLAB 与 PLC 的通讯实现[J]. 机械工程与自动化, 2014(3): 192-193.  
Huang Shuangcheng, Li Zhiwei. Communication between MATLAB and PLC by OPC technology[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(3): 192-193.
- [22] Cao J, Ye Q, Li P. Resistance furnace temperature control system based on OPC and MATLAB[J]. Measurement and Control, 2015, 48(2): 60-64.

## Rapid-response PID control technology based on generalized regression neural network for multi-user water distribution of irrigation system head

Zhang Qian, Wei Zhengying<sup>\*</sup>, Zhang Yubin, Zhang Lei, Jia Weibing, Wei Haoran

(State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Flow rate and pressure are two important control parameters of the irrigation system and they determine if the irrigation process can meet the irrigation demand or not. In the same pipeline system, flow rate and pressure affect each other, and it is difficult to control them separately. This study explored the relationship between flow rate and pressure and their control parameters, established a control technology suitable for the head of water distribution of the multi-user irrigation system. By analyzing the water supply characteristic curve of the pipeline water supply system, a flow pressure coupling adjustment method was proposed. This method allowed system controller output voltage analog and current analog to control the frequency of the inverter and the valve opening of the electric valve. At the same time, a proportion integration differentiation (PID) controller was used to realize the coupling control of the flow rate and the pressure. In addition, a method that use generalized regression neural network (GRNN) to accelerate the speed of PID (GRNN\_PID) was proposed in order to speed up the response of irrigation control system, improve the operating efficiency and ensure the safety of the system. The flow, pressure and corresponding control quantities data were obtained through experiments, and the GRNN method was used to fit the relationship between them. Afterwards, the control quantities required for the target flow and pressure were quickly calculated by the fitting model and were used directly to control the corresponding actuator (pump and electric valve) so as to fine-tune the flow and pressure through PID. The GRNN training results showed that the relative error of the analog quantity used to control the frequency of the frequency converter was between 0.11% and 3.86%, and the relative error of the analog quantity used to control the electric valve was between 0.09% and 5.74%, indicating that the GRNN model has a high fitting accuracy. Three adjustment processes was used to simulate the water demand behavior of three users to verify the control model, and the tests showed that the adjustment times of the three processes of the GRNN\_PID model were 11.6, 10.7 and 7.2 s, respectively, and the adjustment times of the three processes of the PID model were 31.7, 29.6 and 16.9 s, respectively. The GRNN\_PID model greatly reduced the adjustment time of the system and improved the operating efficiency of the system. The control accuracies of GRNN\_PID and traditional PID adjustment method were compared, and the results showed that the steady-state error of the GRNN\_PID adjustment method and the traditional PID adjustment method were both within 1%, and the maximum overshoot was below 8%, which means that the control accuracy is high but the difference is not very big. The reason that leads to this result above is that GRNN accelerates the system regulation speed from the strategy, and it does not change the parameters of PID, and thus it has little impact on the control accuracy of the system. This research can provide tools for the rapid control of flow and pressure in irrigation system.

**Keywords:** flow rate; pressure; neural network; control; coupling; PID regulation