

基于逆模型解耦的风力提水变论域模糊控制

李琳, 周国雄^{*}

(中南林业科技大学计算机与信息工程学院, 长沙 410000)

摘要: 针对风力提水系统风、辅动力存在耦合使控制效果难以保证的问题, 该文提出了一种基于逆模型解耦的变论域模糊控制方法。采用神经网络方法辨识风力提水系统的逆系统, 并与被控对象进行串联, 建立伪线性系统, 实现风、辅动力解耦。同时采用模糊控制器对风、辅动力分别进行独立控制, 对模糊控制器的论域进行改进, 增强系统的环境适应能力。逆模型仿真试验中变量泵控制和柴油机控制量平均误差分别为 6.3%和 4.5%, 实际运行中离心泵的转速平均误差控制在 5%以内, 说明该文方法能有效抑制风速变化的影响。研究结果对风力提水系统的推广具有重要的意义。

关键词: 风能, 神经网络, 模糊控制, 逆模型, 变论域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.007

中图分类号: TP273⁺.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-20-0046-08

李琳, 周国雄. 基于逆模型解耦的风力提水变论域模糊控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 46-53.

Li Lin, Zhou Guoxiong. Variable universe fuzzy control based on inverse-model decoupling for wind water pumping[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 46-53. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国是粮食生产大国, 然而由于自然条件和经济发展的差异, 很多地区存在能源短缺, 架设电网不便等问题, 农业灌溉作业往往只能采用人工方式, 大大限制了灌溉面积, 影响了粮食生产^[1-2]。近年来, 随着新能源技术的发展, 风力为主和常规能源为辅的混合动力提水系统, 在中国发展迅速^[3]。然而风力资源受季节和地域形态影响较大, 提水系统中, 风能和常规能源协同工作, 二者存在相互耦合, 控制效果难以保证。因此研究一种建立在风、辅动力解耦基础上的控制系统, 对于稳定提水效果, 推广风力提水技术, 解决广大农牧区的动力短缺, 改善中国的生态环境都有重要的现实意义。

国外对风力提水系统的研究始于 1977 年^[4], 主要向低扬程高流量和大扬程小流量 2 个方向发展, 对于风、辅动力的解耦控制研究较少, 通常采用 PID (proportion integration differentiation) 控制^[6-7], 模糊控制等传统方法; 对于风力资源相对丰富、稳定

的地区, 传统 PID 控制能够满足使用要求, 而对于风力复杂多变的地区, 这类方法难以达到较好的控制效果。中国风力提水系统的研究开展较晚, 发展较快, 有少数学者将解耦控制引入风力提水控制仿真系统研究中, 取得了不错的成果。但算法复杂, 难以实际应。

针对风力提水系统的现状, 本文提出一种基于逆模型解耦的变论域模糊控制方法。将逆模型解耦方法引入这一控制领域, 建立逆模型, 与被控对象建立伪线性系统, 同时采用变论域模糊控制对风力、其辅助动力输出进行调节, 提升控制系统自调节能力, 提高混合动力提水系统的控制效果。

1 风力提水系统原理及控制方案

柴油动力不需要额外的基础建设, 获取方便, 在风力提水系统中常常用作辅助动力。因此, 本文针对风、柴油混合动力提水系统进行分析, 研究一种基于逆模型解耦的变论域模糊控制方法。

1.1 风力提水原理

风力提水系统本质是将风能转换为水源的动能、势能, 达到农业排水、灌溉的目的。其系统主要由风力传动、柴油动力传动、离心泵 3 个部分组成。

风力传动主要利用风力机将风力转换为旋转扭矩, 由主轴传递给变量泵, 进而传递给变量液压马达, 最终通过联接轴向离心泵输入动力, 达到提水的目的^[4]。其中, 变量泵主要针对风力易发生改变的特点, 动态调节风力机负载, 达到稳定主轴转

收稿日期: 2013-07-14 修订日期: 2013-09-05

基金项目: 国家自然科学基金 (60975049)

作者简介: 李琳 (1977-), 女, 湖南嘉禾人, 讲师, 主要从事电子与自动控制研究。长沙 中南林业科技大学计算机与信息工程学院, 410000. Email: 285570227@qq.com

^{*}通信作者: 周国雄 (1980-), 男, 湖南嘉禾人, 副教授, 博士, 主要从事智能控制、过程控制。长沙 中南林业科技大学计算机与信息工程学院, 410000. Email: 51840157@qq.com

速的作用；变量液压马达，根据主轴转速，调节自身容量，从而保证离心水泵驱动轴工作在额定转速。

柴油动力传动相对简单，主要完成从柴油机动力到离心泵的传递。

离心泵主要完成轴向转矩到水源势能的转换，从而达到农业灌溉的目的。

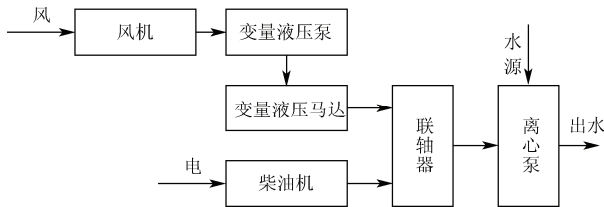


图 1 风电混合提水系统原理图

Fig.1 Structure of wind power hybrid system

变量泵控制量在控制变量风机转速时，会影响离心水泵转速，同样液压泵控制量在影响离心水泵转速时也会影响变量风机转速；但是，变量泵控制量和液压泵控制量之间有着一定的对应关系，变量泵控制量一旦确定，液压泵控制量随之得到确定，因为离心水泵转速是恒定的，同时流体通道中流量处处相等^[4-5]，即

$$u_2 y_2 = u_1 y_1 \quad (1)$$

式中， u_1 为变量泵控制量，%； y_1 为风机转速，r/min； u_2 为液压泵控制量，%； y_2 为离心水泵转速，r/min。

柴油机和风机驱动的液压马达以并联方式驱动离心水泵。柴油机控制量在控制离心水泵转速时，会影响到变量风机转速。因此，风力提水系统实际为一个双输入双输出的耦合系统。

通过对风力提水原理的分析不难看出，提水系统的控制重点就是实现风、辅助动力控制的系统解耦，实现系统输出的稳定可调。

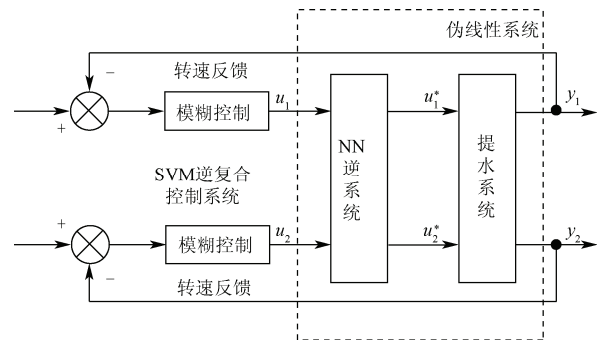
1.2 控制算法

传统的解耦算法有基于专家规则的前馈补偿方法，基于状态方程的解耦方法等，要求被控对象数学模型可描述，而风力提水系统存在一定的非线性，数学模型难以获取，上述方法难以应用。基于逆模型的智能解耦方法，不需要依赖数学模型，在非线形系统控制领域中，取得了不错的效果。因此，针对风力提水控制系统中存在的问题，本文提出了一种基于逆模型的变论域模糊制方法^[8]，其结构如图 2 所示。

整个控制系统由基于神经网络的逆系统解耦补偿，以及基于变论域模糊算法的风、辅助动力独立控制两部分组成。

神经网络解耦补偿器，利用神经网络的自学习特性，对原系统进行逆向辨识，从而逼近风力提水

系统的逆模型，将逆向系统与原系统进行并联，构成伪线性复合系统，从而使风力传动与辅助动力传动转换成相互独立的子系统，然后利用线性系统控制方法对两者进行控制。



注： u_1 为变量泵控制； u_1^* 为变量泵解耦控制量； y_1 为风机转速； u_2 为液压泵控制； u_2^* 为液压泵控制解耦控制量； y_2 为离心水泵转。

Note: u_1 is variable volume pump control; u_1^* is variable volume pump decoupling control; y_1 is fan speed; u_2 is the hydraulic pump control; u_2^* is hydraulic pump control decoupling control; y_2 is centrifugal pump speed.

图 2 控制系统结构

Fig.2 Structure of control system

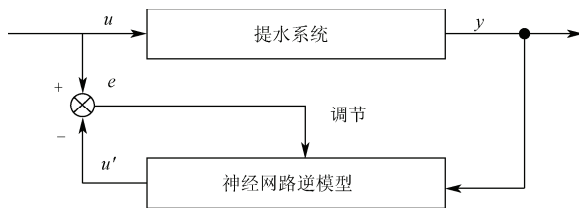
基于变论域模糊算法，首先利用模糊控制器根据风、辅助动力设定值和系统检测反馈值，实现对风、辅助动力独立闭环控制；然后采用变论域模糊算法，解决传感器参数漂移和系统器件参数变化对固定规则模糊算法的影响，提升算法环境适应性。

2 基于神经网络的逆模型

近年来，智能算法被越来越多地用于模型辨识的研究中，常用智能算法有神经网络，决策树、支持向量机^[9-15]等，这些算法能够在解决建立和更新预测模型问题时，对被辨识对象直接进行学习和分析。但是决策树算法对人类经验的依赖性较强，对于风力提水控制系统而言，采用固定规则的决策树方法，往往很难适应参数变化；支持向量机虽然能保证一定程度的精度要求，但由于算法的收敛性较弱，且容易陷入局部最优，辨识精度不高，使其应用范围大大降低。

本文主要利用神经网络的快速学习的特点，在一定时间范围、空间范围和过程参数相对稳定的条件下，对风力提水系统的双输入双输出变量的耦合关系进行动态学习，建立原系统的逆模型。

基于神经网络的风力提水系统建立方法如图 3 所示。 y 表示为原系统的输出，逆系统中为作为输入样本； u 表示原系统的输入，逆系统中为作为输出样本。 u' 表示 SVM (support vector machine) 训练结果， e 表示 u 和 u' 的误差，作为调节神经网络的训练过程的指标。



注: u 为原系统输入; u' 为逆系统输出; y 为原系统输出; e 为误差。
Note: u is original system input; u' is inverse system output; y is the output of the original system; e is error.

图3 神经网络逆模型建立原理

Fig.3 Principle of inverse modeling base on neural network

BP 网络结构直接关系到最终的预测精度^[8]。因此本文在风力提水系统的自身特点的基础上,从确定网络层数、隐层神经元个数、输入输出点数和激活函数^[9]、初始值以及学习速率等几个方面进行设计。

2.1 确定网络的层数

BP 神经网络通常具有一个或多个隐层,其中隐层神经元通常采用 Sigmoid 型传递函数。有理论证明单隐层的 BP 神经网络,当隐层神经元数目足够多时,可以以任意精度逼近任何具有有限间断点的非线性函数^[16-17]。对于风力提水检测系统来说,增加层数可进一步降低误差,提高精度,但同时也使网络复杂化,增加了网络权值和阈值的训练时间。实际上,精度的提高可以通过增加隐层中的神经元数目来获得,对于隐层的选取,考虑风力提水检测误差的变化呈现连续非线性,而非不连续性,因此采用 1 个隐层。

2.2 节点数的选取

根据提水系统的工作原理分析可知,系统的输入为变量泵控制量和柴油机控制量,分别为 u_1 、 u_2 ,输出为风机转速和离心水泵转速,分别为 y_1 、 y_2 。转换为逆模型辨识问题后,原系统的输出作为神经网络的输入即: y_1 、 y_2 ,原系统的输入作为神经网络的输出即: u_1 、 u_2 。

2.3 隐层神经元数目的选择

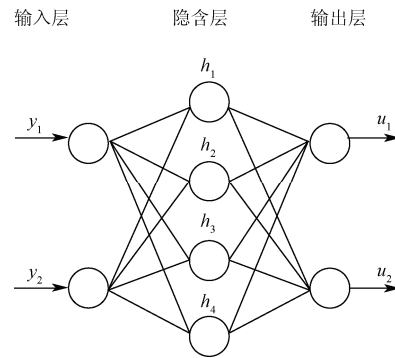
为了同时保证精度和收敛速度,隐层神经元数目可由经验公式获得^[18]

$$N_2 \geq lbT \quad (2)$$

式中, N_2 为隐层神经元个数; T 为训练样本的维数; l 为隐层层数, b 为系数。在实际风力提水检测系统中增加隐层神经元数目,可以提高测量精度,但隐层数神经元数目的增加必然导致巨大的计算量。综合考虑精度和计算量,隐层神经元数目选为 4。

本文所采用的 BP 神经网络结构形式如图 4 所示,包括由风机转速和离心水泵转速组成的 2 维矢量的输入层; 4 个神经元组成的一个隐含层; 以及

变量泵控制量和柴油机控制量组成的线性输出层。



注: y_1 为风机转速, r/min; y_2 为离心水泵转速, r/min; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 为隐层; u_1 为变量泵控制量; u_2 为液泵控制量。
Note: y_1 is fan speed, r/min; y_2 is centrifugal pump speed, r/min; h_1 , h_2 , h_3 , h_4 is implicit strata; u_1 is variable volume pump control; u_2 is the hydraulic pump control.

图4 BP神经网络机构

Fig.4 BP neural network mechanism

2.4 BP 神经网络算子的设计

在本文所提出的风力提水检测算法中,需要解决 BP 算法的 2 个问题,一是收敛速度慢,二结果局部性问题。这 2 点可能导致算法的收敛性变差,或者导致最终的逆模型不是全局最佳,难以满足精度要求。

动量法可以降低神经网络对误差曲面局部细节的敏感性,有效地抑制了网络陷于局部极小^[19-20]。标准 BP 算法采用最速下降静态对算法进行寻优,在修正 $\omega(k)$ 时,只按照 k 时刻的负梯度方向进行修正,没有考虑以前积累的经验,从而使学习系统发生振荡,收敛缓慢^[21]。本文采用式 (3) 所示改进算法

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \alpha[(1-\eta)D(k) + \eta D(k-1)] \quad (3)$$

式中, $D(k)$ 为单个的权值; $D(k) = \frac{-\alpha E}{\partial \omega(k)}$ 为 k 时刻

的负梯度, E 为目标函数; $D(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的负梯度; α 为学习率, $\alpha > 0$; η 为动量因子, $0 \leq \eta \leq 1$ 。动量项实质为阻尼项,可以降低算法的振荡趋势,改善收敛性。

学习率是 BP 算法中的难点。学习率选得太小,收敛太慢;选得太大,则有可能修正过头,导致振荡甚至发散。因此采用式 (4) 自适应调整学习率,对标准 BP 算法进行改进

$$\begin{aligned} \omega(k+1) &= \omega(k) + \alpha(k)D(k) \\ \alpha(k) &= 2\lambda\alpha(k-1) \\ \lambda &= \text{sign}[D(k)D(k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

当连续 2 次迭代其梯度方向相同时,表明下降太慢,这时可使步长加倍;当连续 2 次迭代其

梯度方向相反时，表明下降过头，这时可使步长减半。

3 变论域模糊控制

风力和辅助动力控制器是决定提水系统稳定性的重要环节。在提水生产系统中，由于受自然风力变化的影响，风力和辅助动力变化都呈现随机性、非线性的特点，其模型难以精确描述。对于这类对象，传统控制方法在系统超调和响应时间上效果较差。

模糊控制对数学模型没有依赖性^[22-24]，能同时将专家经验知识高效融合，呈现较好的鲁棒性和动态性能，对滞后系统的控制效果较好^[25-28]，应用十分广泛。

传统的模糊控制器本质为插值器，要提升插值精度，就需要增加模糊规则数量，增加了控制的复杂度，否则就难以适应控制系统环境的变化，实现高精度控制。风力提水控制系统中，风、辅助动力传感器检测值，风、柴油机的性能曲线会随着具体风力、气压等环境因素的变化而产生漂移，选用传统模糊控制策略，难以满足提水系统对环境的自适应能力。

变论域模糊控制器，在不改变规则的前提下，使论域随着误差正比例的扩大或缩小，从而一定程度上解决了控制复杂度和控制精度的矛盾，提升了算法的环境适应能力，满足风力提水风、辅助动力控制要求。随着风、辅助动力检测值和设定值误差的减小，将模糊控制器输入论域压缩 a 倍($0 < a \leq 1$)，使输入论域的划分变更细，从而达到稳定提水效果的目的。

3.1 模糊控制器的设计

风、辅助动力模糊控制器采用双输入，单输出结构。其中风力模糊控制器，输入为风机转速与设定值偏差 e_f 和偏差变化率 ec_f ，输出变量泵控制量 u_1 。 e_f 的模糊变量为 {NL, NM, NS, O, PS, PM, PL}，初始论域 $E_f = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。 ec_f 的模糊变量为 {NL, NS, O, PS, PL}，初始论域 $EC_f = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ 。 u_f 模糊变量为：{NL, NM, NS, O, PS, PM, PL}，初始论域 $U_f = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

辅助动力模糊控制器，输入为离心水泵转速与设定值偏差 e_a 和偏差变化率 ec_a ，输出为柴油机控制量 u_a 。 e_a 的模糊变量为 {NL, NM, NS, O, PS, PM, PL}，初始论域 $E_a = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ ； ec_a 的模糊变量为 {NL, NS, O, PS, PL}，初始论域为 $EC_a = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ； u_a 的模糊变量为：{NL, NM, NS, O, PS, PM, PL}，

初始论域 $U_a = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

隶属度函数是决定模糊控制器控制效果的重要因素。为了更好的抑制环境参数变化对风力提水控制系统的影响，本文采用梯形函数，作为于风、辅助动力模糊控制器输入、输出的隶属度函数

$$F_{trapmf} = \begin{cases} 1 & (c \leq x \leq b) \\ \frac{a-x}{a-b} & (b \leq x \leq a) \\ \frac{c-x}{c-d} & (d \leq x \leq c) \\ 0 & (a \geq x \text{ or } x \leq d) \end{cases} \quad (5)$$

式中， F_{trapmf} 为隶属度取值； x 为模糊控制器论域取值， a 、 b 、 c 、 d 为梯形隶属度函数的参数。

按照风力提水系统的专家经验，风、辅助动力模糊控制的规则，均按照偏差较大时快速调节，偏差较小时精细调节的原则，总结出模糊控制规则，如表 1 所示。

根据所本文所设计的模糊推理规则，利用 Mamdani 模糊推理方法进行解模糊，表变量泵控制量和柴油机控制量可以通过清晰化接口和查询表求解。

表 1 推理语言规则表

Table 1 Rules table of reasoning language

误差变化率 Error rate of change EC	误差 Error E						
	NL	NM	NS	O	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NS	NS	O	PS
NS	NL	NM	NM	NS	O	PS	PM
O	NL	NM	NS	O	PS	PM	PL
PS	NM	NS	O	PS	PM	PM	PL
PL	NS	O	PS	PS	PM	PL	PL

3.2 变论域参数设计

在基于规则的模糊控制器的基础上，本文引入伸缩因子，对模糊控制器的论域进行改进。设 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2]$ ， β 分别是输入和输出论域的伸缩因子，则变换后的论域为^[29]

$$\begin{cases} E(e_1) = [-\alpha_1(e_1)8, \alpha_1(e_1)8] \\ E(e_2) = [-\alpha_1(e_2)6, \alpha_1(e_2)6] \\ U(e_1, e_2) = [-\beta(e_1, e_2)7, -\beta(e_1, e_2)7] \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2]$ 为输入论域的伸缩因子； β 为输出论域的伸缩因子； e_1 、 e_2 为偏差和误差变化率。

设 F_{cf1g} 表示常规模糊的输出，则变论域控制器输出为

$$F_{vflg}(e_1, e_2) = \beta(e_1, e_2) \cdot F_{cf1g}(e_1/\alpha_1(e_1), e_2/\alpha_2(e_2)) \quad (7)$$

论域伸缩因子有多种实现方法，为保证系统的稳定性^[15]，本文采用积分调节法，同时为不改变推理结果的符号，本文对输出变论域因子 β 采用求绝

对值运算, 实现方法如式 (8) 所示^[30-31]

$$\begin{cases} \alpha_1(e_1) = 1 - \lambda \exp(-ke_1^2), \lambda \in (0,1), k > 0 \\ \alpha_2(e_1) = 1 - \lambda \exp(-ke_2^2), \lambda \in (0,1), k > 0 \\ \beta(t) = \left| K \int_0^1 (p_1 \cdot e_1(\tau) + p_2 \cdot e_2(\tau)) d\tau + \beta(0) \right| \end{cases} \quad (8)$$

式中, K 为正的比例因子, p_1 、 p_2 为 Lyapunov 方程对称正定矩阵解的最后一列, 可离线计算; λ 为 (0,1) 区间的常量, 对伸缩幅度起调节作用; τ 为时间量。

为了在输入变量较小时, 进行论域压缩。风机转速偏差、离心水泵转速和其偏差变化率的伸缩因子, 分别按照式 (9)、(10) 进行修正, 仅对零点附近的模糊子集 ZO 采用论域压缩。

$$\alpha_1(e) = \begin{cases} 1 - \lambda \exp(-ke_1^2), \lambda \in (0,1), k > 0 & \text{当 } |e_{\text{设定}} - e_2| < \theta \\ 1 & \text{当 } |e_{\text{设定}} - e_2| \geq \theta \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha_2(e) = \begin{cases} 1 - \lambda \exp(-ke_2^2), \lambda \in (0,1), k > 0 & \text{当 } |e_{\text{设定}} - e_2| < \theta \\ 1 & \text{当 } |e_{\text{设定}} - e_2| \geq \theta \end{cases} \quad (10)$$

式中, $e_{\text{设定}}$ 为规定的误差变化率期望值, θ 为允许的偏差量。

初值 $\beta(0)$ 需要根据风力提水系统实际情况进行调整, 本文取 $\beta(0)=1$ 。结合式 (9)、(10) 和式 (7) 中可得模糊控制器的控制律

$$u(t) = \left| K_I \int_0^1 (p_1 \cdot e(\tau) + p_2 \cdot ec(\tau)) d\tau + \beta(0) \right| U \cdot F_{\text{cf lg}} \quad (11)$$

4 系统仿真

为了验证本文方法的可行性, 首先针对逆模型建模方法进行仿真试验; 同时为了验证本文提出算法的有效性, 采用试验对比的方式, 从系统性能的角度对控制系统效果进行分析。

本文采用神经网络方法建立风力提水系统逆的模型。样本来自某风电混合提水正常工作中产生的 1 500 组风机转速、离心水泵转速、变量泵控制量和柴油机控制量的实测数据; 选用其中 500 组实际运行数据作为试验样本。实现步骤如下:

Step 1: 针对该风力电提水系统, 统一初始化连接权重为 (-1, 1) 间的随机值, 设定目标函数如式 (12), 给定的收敛精度为 $\varepsilon = 0.001$ 。

$$E_m(k) = \frac{1}{2} e_m(k)^2 \quad (12)$$

式中, $E_m(k)$ 为目标函数, e_m 为迭代误差。

Step 2: 从 500 组实际运行数据中, 随机选取第 k 组风机转速、离心水泵转速作为输入样本,

以及对应变变量泵控制量和柴油机控制量作为期望输出, 设置最大迭代计算次数为 20。

Step 3: 计算隐含层各神经元的输入和输出。

Step 4: 利用网络期望输出和实际输出, 计算误差函数对输出层的各神经元的偏导数 $\delta_o(k)\alpha$

Step 5: 利用隐含层到输出层的连接权值、输出层的 $\delta_o(k)$ 和隐含层的输出计算误差函数, 以及公式 (4) 所示的改进学习方法, 计算隐含层各神经元的改进偏导数 $\delta_h(k)$ 。

Step 6: 利用输出层各神经元的 $\delta_o(k)\alpha$ 和隐含层各神经元的输出来修正连接权值 $\omega_{ho}(k)\alpha$

Step 7: 利用隐含层各神经元的 $\delta_h(k)$ 和输入层各神经元的输入修正连接权。

Step 8: 按照公式 (12) 计算全局误差。

Step 9: 判断网络误差是否满足要求。当误差达到预设精度或学习次数大于设定的最大次数, 则结束算法。否则, 返回到 Step2, 进入下一轮学习。

图 5 和图 6 分别为利用逆模型拟合得到的风机转速仿真曲线, 和离心水泵转速仿真曲线。

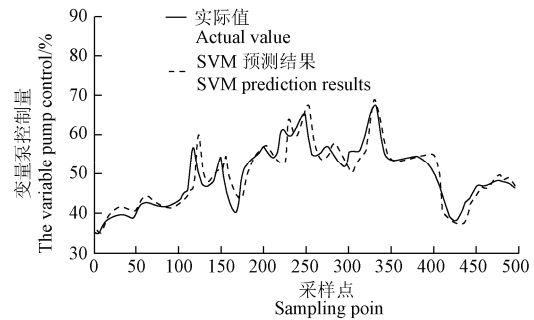


图 5 变量泵控制量仿真曲线

Fig.5 Simulation curve of variable pump control

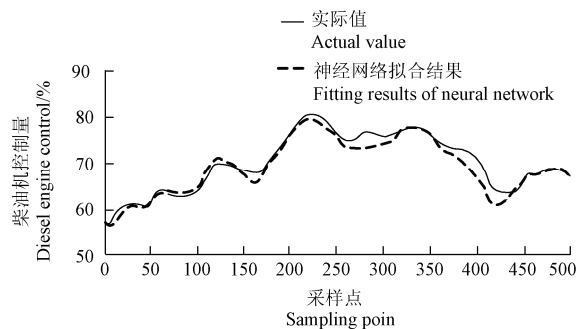


图 6 柴油机控制量仿真曲线

Fig.6 Simulation curve of diesel engine control

从图 5 和图 6 中可以看出, 对风力提水系统, 神经网络能够根据不多的样本数据, 进行有效辨识, 建立精度相对较高逆模型, 其中变量泵控制量平均误差仅为 6.3%, 而柴油机控制量为 4.5%, 这主要是因为原系统的风、辅动力变化存在一定的滞

后性，因此辨识得到的曲线与实际曲线存在一定的相位差，导致误差偏大，在实际应用中，可通过相位补偿的方法修正。

5 试验分析

5.1 系统性能试验

采用目前风力提水系统中常用的PID算法与本文提出的基于神经网络逆模型解耦的变论域模糊控制方法，对系统性能进行对比试验。由于高扬程对系统的阶跃响应水平要求较高，因此按照提水系统高扬程工作时的系统输出需要，离心水泵转速设定值为 800 r/min，风机转速设定值为 500 r/min。

图 7 和图 8 分别为在提水系统中风、辅动力变化试验对比曲线。由于采用了逆模型解耦的控制方法，有效降低了风、辅动力间的耦合性，风、辅动力控制量能够直接作用于被控对象，有效降低了系统响应时间；且由于引入了变论域模糊控制，系统的精度大大提升，稳态误差也进一步缩小。

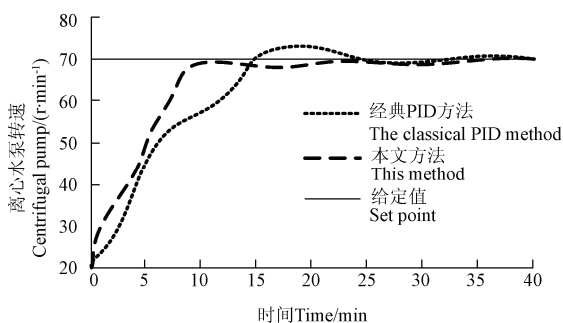


图 7 离心水泵转速控制对比试验曲线

Fig.7 Curve of centrifugal pump speed control

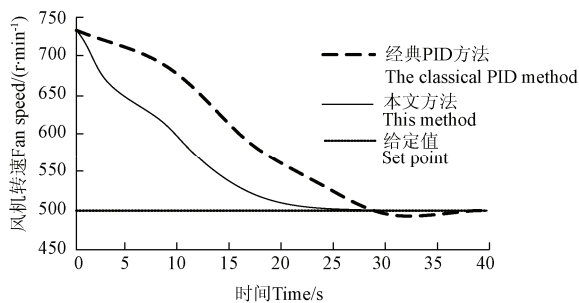


图 8 风机转速控制对比试验曲线

Fig.8 Curve of fan speed control

分析结果表明，采用本文算法后，风力控制误差小于 4%，相对辅助动力误差仅为 2.7%。明显优于传统的 PID 控制。

5.2 控制效果对比试验

本文针对某风电混合提水设备的控制系统进行升级改造，采用本文算法实现风、辅动力的解耦控制。

为了研究本文算法对提水设备的实际控制效

果，采用改造前的设备与改造后的设备（其中改造前的提水设备采用 PID 算法），同时同地进行相同自然条件下的对比试验，由于中等扬程工作时对提水系统的控制要求较高，为了说明本文算法的有效性，离心水泵转速设定值为 650 r/min。实际控制效果的对比试验数据如图 9 所示。

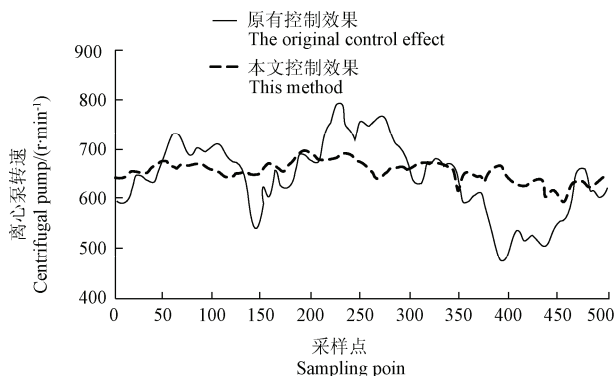


图 9 控制效果对比试验曲线

Fig.9 Experimental curve of control effect

离心泵的转速决定了最终的扬程效果，其稳定性决定了风力提水设备的控制效果和环境适应能力，从图 9 中不难看出，由于采用了逆模型解耦，控制量的耦合性降低，模糊控制的效果得以有效保证，从而更好的协调了风力和柴油动力间的协调工作，大大降低了误差，平均误差仅为 5%，远远好于原系统，稳定了离心泵的转速，最大程度的减小了风力不稳定对提水设备使用的影响。

6 结论

本文在对风力提水系统深入分析的基础上，针对风力提水系统中，物理化学复杂，风、辅动力耦合严重的问题，提出了一种基于神经网络逆模型解耦的变论域模糊控制方法。采用神经网络方法对原系统的逆系统进行辨识，并与原系统进行串联，建立伪线性系统，实现风、辅动力解耦。同时采用模糊控制器对风、辅动力独立控制，利用变论域理论对模糊控制论域进行改进，增强系统的环境适应能力。逆模型仿真试验中变量泵控制和柴油机控制量平均误差分别为 6.3%和 4.5%，实际运行中离心泵的转速平局误差控制在 5%以内，证明了本文方法的有效性。

[参 考 文 献]

[1] 查咏. 风力机与离心水泵匹配的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 204-206.
Zha Yong. The study of wind power machine pumping water matching[J]. Transactions of the CSAM, 2004, 35(4): 204-206. (in Chinese with English abstract)

[2] Bueno C, Carta J A. Wind powered pumped hydro Storage

- systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the canary islands[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(4): 312–340.
- [3] Ignas Sateikis, Stefa Lynikiene, Bronius Kavolelis. Analysis of feasibility on heating single family houses in rural areas by using sun and wind energy[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(6): 695–700.
- [4] Abdne S, Winson X. Controlde sign and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generatorunit[J]. *IEEE Trans. on EC*, 2000, 15(3): 91–96.
- [5] 郭振武, 李永光, 吕欣欣. 户用风力发电与电网联合供电模式浅析[J]. *上海电力学院学报*, 2007, 23(2): 110–112.
Wu Zhenwu, Li Yongguang, Lü Xinxin. Analysis of the power supply modes of household wind power generation combined with the grid[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2007, 23(2): 110–112. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡玉龙, 郑培, 刘建江. 变行程风力提水技术[J]. *可再生能源*, 2007, 25(4): 76–78.
Hu Yulong, Zheng Pei, Liu Jianjiang. Variable stroke wind water pumping technology[J]. *Renewable Energy*, 2007, 24(4): 76–78. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李彦德. 风力提水在山区水土保持中的应用[J]. *水土保持*, 2010, 25(10): 56–58.
- [8] 吴敏, 周国雄, 雷琪, 等. 多座不对称焦炉集气管压力模糊解耦控制[J]. *控制理论与应用*, 2010, 25(1): 50–53.
Wu Min, Zhou Guoxiong, Lei Qi, et al. Fuzzy decoupling control for gas pressure of collector for coke-ovens with asymmetry[J]. *Control Theory and Applications*, 2010, 25(1): 50–53. (in Chinese with English abstract)
- [9] Bo Cuimei. Research on the modeling method based on eliding time window for support vector machine soft-sensing[J]. *Automatic Instrument*, 2006, 27(1): 45–51.
- [10] 周国雄, 赖旭芝, 曹卫华, 等. 焦炉集气管压力智能解耦控制系统的应用[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(3): 558–561.
Zhou Guoxiong, Lai Xuzhi, Cao Weihua, et al. Application of intelligent decoupling control system for coke-oven collector pressure[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, 37(3): 558–561. (in Chinese with English abstract)
- [11] Azaron A, Perkgoz C, Sakawa M. A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 168(2): 1317–1339.
- [12] Xue Yali, Jiang Changsheng. Trajectory linearization control of an aerospace vehicle based on RBF neural network[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(4): 799–805.
- [13] Azaron A, Perkgoz C, Sakawa M. A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 168(2): 1317–1339.
- [14] Satoshi Tsuyuki. Global positioning system-its alocation to forest proceedings of the symposium an forest inventory and monitoring in East Asia[J]. *IEEE Trans on Intelligent Systems*, 2008, 25(2): 21–24.
- [15] 陈俊杰, 芦俊, 黄惟一. 基于遗传神经网络的传感器系统的非线性校正[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 34(2): 89–92.
Chen Junjie, Lu Jun, Huang Weiyi. Non-linearity rectification of sensor systems based on genetic neural networks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 34(2): 89–92. (in Chinese with English abstract)
- [16] 魏海坤, 徐嗣鑫, 宋文忠. 神经网络的泛化理论和泛化方法[J]. *自动化学报*, 2009, 6(10): 82–86.
Wei Haikun, Xu Sixin, Song Wenzhong. Generalization theory and generalization methods for neural networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 6(10): 82–86. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨春波. 基于灰色模型与人工神经网络的改进组合预测模型及其应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.
Yang Chunbo. Improved Combination Forecasting Model and its Application Based on Grey Model and Artificial Neural Network[D]. Jinan: Shandong Normal Uuniversity, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨星, 朱大栋, 何勇, 等. 基于灰色神经网络模型下的船闸货运量预测[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2013, 37(1): 120–123.
Yang Xing, Zhu Dadong, He Yong, et al. Forecast of the lock freight volume based on grey neural network algorithm[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering*, 2013, 37(1): 120–123. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘辉, 田红旗, 李燕飞. 基于小波分析法与神经网络法的非平稳风速信号短期预测优化算法[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(9): 2704–2711.
Liu Hui, Tian Hongqi, Li Yanfei. Short-term forecasting optimization algorithm for unsteady wind speed signal based on wavelet analysis method and neutral networks method[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(9): 2704–2711. (in Chinese with English abstract)
- [20] 周国雄, 吴敏. 基于改进的灰色预测的模糊神经网络控制[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(10): 68–71.
Zhou Guoxiong, Wu Min. Fuzzy neural network control based on improved gray prediction[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(10): 68–71. (in Chinese with English abstract)
- [21] 何庆飞, 陈桂明, 陈小虎, 等. 基于改进灰色神经网络的液压泵寿命预测[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(4): 500–506.
He Qingfei, Chen Guiming, Chen Xiaohu, et al. Life prediction of hydraulic pump based on an improved grey neural network[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(4): 500–506. (in Chinese with English abstract)
- [22] Mann G K I, Gosine R G. Three dimensional min max gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008(2): 300–323.
- [23] 赖旭芝, 周国雄, 曹卫华, 等. 焦炉集气管的模糊专家控制方法及其应用[J]. *控制工程*, 2006, 13(2): 108–110.
Lai Xuzhi, Zhou Guoxiong, Cao Weihua. Method and application of fuzzy-expert control system in coke-oven for gas collector pressure[J]. *Control Engineering of China*, 2006, 13(2): 108–110. (in Chinese with English abstract)
- [24] Cheng Chibin. Fuzzy process control: construction of control charts with fuzzy numbers[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 154(2): 287–303.
- [25] Yang Chunhua, Gui Wweihua, Kong Llingshuang, et al. A two-stage intelligent optimization system for the raw slurry preparing process of alumina sintering production[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(4/5): 786–795.

- [26] Ding Baocang. Improving the asymptotically necessary and sufficient conditions for stability of fuzzy control[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, 161(21): 2793—2794.
- [27] Zhao Yan, Gao Huijun, Lam J, et al. Stability and stabilization of delayed T-S fuzzy systems: a delay partitioning approach[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(4): 750—762.
- [28] Zhang Huaguang, Yang Dedong, Chai Tianyou. Guaranteed cost networked control for T-S fuzzy systems with time delays[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2007, 37(2): 160—172.
- [29] Jiang X., Han Qinglong. On designing fuzzy controllers for a class of nonlinear networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 16(4): 1050—1060.
- [30] Tong Shaocheng, Ren Chang. Adaptive fuzzy decentralized control for nonlinear large-scale systems based on high-gain observer[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2012, 26(1): 72—76.
- [31] Lai Yinan, Dai Ye, Bai Xue. Discrete variable structural optimization based on multidirectional fuzzy genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(2): 56—61.

Variable universe fuzzy control based on inverse-model decoupling for wind water pumping

Li Lin, Zhou Guoxiong*

(School of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry, Changsha 410000, China)

Abstract: In recent years, with the development of new energy technology, a hybrid water system of wind power and conventional energy supplement was rapidly developed in China. However, wind resources are affected by seasonal and geographical patterns, water system, wind energy, and conventional energy cooperation. The two are mutual coupling, so the control effect is difficult to guarantee. Therefore studies of one kind of establishment of auxiliary control system based on dynamic decoupling in the wind, the stability, water effect, and promotion of wind water pumping technology to solve the power shortage in agricultural and pastoral areas, have important practical significance for improving the ecological environment in China.

The traditional decoupling algorithm with a feed-forward compensation method based on expert rules and the state equation decoupling method based on requirements, moths model of controlled object were described, because the wind is certain nonlinear water system, and mathematical models are difficult to access, so these methods are difficult to use. An intelligent decoupling method based on an inverse model does not need to rely on the mathematical model, or the nonlinear control system in the field, and achieved good results.

Based on the in-depth analysis of the water system on the wind, the wind water pumping system, physical and chemical complex, the wind, the auxiliary power coupling problem, the paper put forward a fuzzy control method based on a neural network inverse decoupling variable. By using the neural network method to identify the inverse system of the original system, and being connected in series with the original system, a pseudo linear system, the wind, the auxiliary power is decoupling. At the same time, the fuzzy controller to control the wind, auxiliary power independently, using the variable universe theory to improve the fuzzy control theory domain, enhance the system's ability to adapt to the environment.

The control system consisted of the inverse system decoupling compensation based on a neural network, and based on the variable universe fuzzy algorithm in wind, and the auxiliary power independent control of the two parts. A neural network decoupling compensator, utilizing the self-learning characteristic of the neural network, the reverse identification of the original system, thus approaching wind inverse model of water system, the parallel inverse system with the original system, a pseudo linear system, so that the wind power transmission and auxiliary power transmission and conversion into subsystems are independent of each other, then a linear system control method was used to control the variable universe fuzzy algorithm based on a fuzzy controller. First, according to the wind, the auxiliary power was set the detection feedback value and system, the wind, the auxiliary power closed the loop control; and then the variable universe fuzzy algorithm was used to solve the parameter sensor parameter drift and system device of fixed rules of fuzzy algorithm, the algorithm is adaptation to environment improvement.

In order to verify the feasibility of this method, the inverse modeling method of a model simulation test; at the same time, in order to validate the proposed algorithm, the test of comparison, carried on the analysis to the control system from the point of system performance. The inverse model in the simulation experiment of variable pump and diesel engine control showed average errors of 6.3% and 4.5%, and a centrifugal pump speed error in the actual operation of the control within 5%, proved the effectiveness of this method. This fully illustrated the influence of the method in this paper that can effectively restrain the velocity changes, and has extremely vital significance to the promotion of the water system of the wind.

Key words: wind power, neural networks, fuzzy control, inverse mode, variable region

(责任编辑: 鲍洪杰)