DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.09.017

# 基于改进 BP 神经网络的螺杆泵转速预置模型研究*

梁 辉,王世杰*,钱 程
(沈阳工业大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110870)

**摘要**:在螺杆泵的采油过程中,因受到多方面因素的影响,而不能对转子的转速进行准确、实时的调整,为了解决这一问题,提出了一种基于改进 BP 神经网络的螺杆泵转速预置模型。首先,利用基于 L-M 算法的 BP 神经网络方法,预测了螺杆泵当前条件下的最优转速;然后,将所预测的螺杆泵最优转速传递给转速调整模块;最后,通过 PID 控制调节电机转速,构成了转速预置模型,该模型可以根据实时测得的原油温度、原油黏度、泵端压差、容积效率等数据来预置该条件下螺杆泵的最优转速。仿真实验结果表明:该模型对螺杆泵各工况下的最优转速预测平均相对误差为 0.96%。研究结果表明:该模型对螺杆泵转速实时预置具有较好的效果,可为潜油螺杆泵采油系统中转速的实时调整打下基础,有利于提高螺杆泵的使用效率和经济使用寿命。

**关键词**:螺杆泵;转速预置;L-M 算法;神经网络
**中图分类号**:TH327;TE938 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-4551(2021)09-1197-05

# Preset model of screw pump speed based on improved BP neural network

LIANG Hui, WANG Shi-jie, QIAN Cheng
(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract**: The rotor speed could not be adjusted accurately in real time, due to the rotor speed was affected by many factors in the process of progressing cavity pump production. In order to solve the problem, a presetting model of screw pump speed based on BP neural network was proposed. Firstly, the BP neural network method based on L-M algorithm was used to predict the optimal speed of the progressing cavity pump under the current conditions. And the predicted optimal speed was transferred to the speed adjustment module. Finally, the motor speed was adjusted by PID control to form the preset model of the speed, which could preset the optimal speed of the screw pump based on the real-time measured crude oil temperature, crude oil viscosity, pump end pressure difference and volumetric efficiency. The simulation experiment results show that the model has an average relative error of 0.96% in predicting the optimal speed of the screw pump under various working conditions. The results show that the model has a good effect on the real-time preset of the speed, which lays a good foundation for the real-time adjustment of the speed in the submersible screw pump oil extraction system. The basis of this is conducive to improving the efficiency and economic life of the screw pump.

**Key words**: screw pump; speed preset; L-M algorithm; neural network

## 0 引 言

在石油开采过程中,随着高含砂井、稠油井的增多,以及斜井、水平井等新技术的应用,使得油田开发的难度增大,常用的抽油机、电潜泵、水力活塞泵等设备在该类井中采油具有较大的局限性[1,2]。

潜油螺杆泵作为一种新兴的采油设备能够适应上述井况,并且具有同比采油量能耗低、结构简单、占地

**收稿日期**:2020-12-25
**基金项目**:中央引导地方专项资金资助项目(2020JH6/10500016)
**作者简介**:梁辉(1996-),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事螺杆泵转速控制方面的研究。E-mail:lianghui0909@qq.com
**通信联系人**:王世杰,男,博士,教授。E-mail:wang_shijie@263.net

面积小等特点;同时,螺杆泵在降低采油成本、提高采油效率等方面要优于传统的抽油机和电潜泵,目前其已逐步被推广使用,并且取得了良好的经济效益和社会效益[3-5]。

在螺杆泵的采油过程中,螺杆泵转速的选择至关重要。转速的不合理选择,不仅得不到良好的采油效率,还会加速螺杆泵的磨损,甚至造成“烧泵”现象的出现,严重影响螺杆泵的使用寿命,造成重大的经济损失。而螺杆泵转速的选取常与油井工况、泵的结构参数、泵的使用周期有关[6]。在采油过程中,若能根据上述情况实时地选择并调整螺杆泵合适的转速,将会有效地提高螺杆泵的采油效率和使用寿命。因此,建立螺杆泵转速预置模型,并且根据不同的工况条件,调整螺杆泵达到最优转速具有十分重要的工程意义。

李聪[7]建立了螺杆泵转速及其主要影响因素之间的非线性映射关系。沈立伟[8]采用变频调速控制电机转速来提高螺杆泵的使用寿命。以上研究虽然取得了一些进展,但都未考虑泵的结构参数对其的影响,也未对螺杆泵的智能控制做出深入研究。

本文主要研究改进 BP 神经网络在螺杆泵转速预测中的应用,利用 BP 神经网络来挖掘不同工况对螺杆泵转速要求的内在联系,同时考虑螺杆泵的结构参数—定子橡胶的磨损间隙的影响,构建螺杆泵最优转速预测模型;并通过 PID 控制,自动调节电机转速,实现螺杆泵的转速预置,提高泵的使用效率及寿命。

# 1 潜油螺杆泵采油系统及其转速影响因素分析

## 1.1 潜油螺杆泵采油系统

潜油螺杆泵由井下潜油电机带动螺杆泵转子,以较低转速转动来实现石油举升。它包含井下电机、保护器、减速器、联轴体、螺杆泵、变频器等装置。

与其他采油设备相比,潜油螺杆泵具有适应井液范围广、不存在杆管偏磨问题、易于管理、高效节能等优点,适用于稠油井、含砂井、气井,能够完成斜井、水平井和定向井的采油作业[9]。

## 1.2 螺杆泵转速影响因素分析

### 1.2.1 原油黏度

螺杆泵的举升是依靠转子与定子之间形成密封腔带动石油举升。螺杆泵的转子以适当的方向转动时,吸入端存在负压,当原油黏度较小时,原油可以迅速充满腔室,使螺杆泵具有良好的容积效率。

当原油黏度较大时,由于其流动性较差,在一个密封腔的形成过程中,原油不能有效填满密封腔,使得螺杆泵容积效率下降,且此时密封腔内存在气体,转子与定子橡胶间产生干摩擦,加速橡胶磨损,降低螺杆泵使用寿命。

因此,在原油黏度较大时,应适当降低螺杆泵的转速[10]。

### 1.2.2 井下原油温度

油井的温度会对螺杆泵的性能产生影响[11,12]。当油井温度升高时,有利于螺杆泵从停机状态下进行启动,且定子橡胶由于温度的提升产生热胀效应,增大了与转子之间的过盈量,密封效果更好,螺杆泵具有更高的容积效率,但同时增大了定子转子之间的摩擦阻力,使螺杆泵机械效率下降。

随着温度的升高,橡胶表面磨蚀加速,橡胶表面分子链的重新组合加快,力学性能降低,橡胶表面疲劳磨损加剧。

所以在温度较高时,应选择较低的转速,以提高螺杆泵的使用寿命。

### 1.2.3 泵端压差

螺杆泵的泵端压差也会对转速产生影响[13]。螺杆泵工作时,吸油口与出油口间产生压差,当压差较小时,定子与转子间完美接触,螺杆泵具有良好容积效率。

当压差持续增大时,定子与转子间产生空隙,造成原油泄漏,螺杆泵容积效率降低。

螺杆泵泵端压差与容积效率的关系图如图 1 所示。

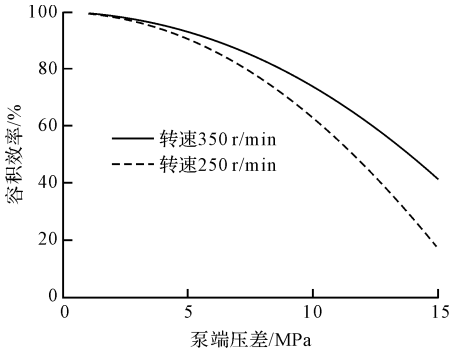


图 1 螺杆泵泵端压差与容积效率的关系图

从图 1 中可以看出,在同一转速下,当螺杆泵泵端压差增大,泵的容积效率下降;但当转速由 250 r/min 增大至 350 r/min 时,泵的容积效率明显增高。

因此,当螺杆泵泵端的压差增大时,应适当提高其转子的转速。

### 1.2.4 螺杆泵定子橡胶的磨蚀

螺杆泵定子橡胶的磨蚀是影响泵转速选择的又一

个重要因素,主要形式有摩擦磨损、疲劳磨损和磨粒磨损等[14]。螺杆泵转速提升,油液在转子与定子橡胶之间高速流动,致使橡胶表面温度升高,加剧了橡胶的摩擦磨损和疲劳磨损;同时,油液中包含的沙砾在高速流动中,加剧了与橡胶表面的磨粒磨损,降低了螺杆泵使用寿命。

因此,为了降低磨损,保护螺杆泵的使用寿命,应该适当调低其转速。

## 2　基于改进 BP 神经网络的转速预置模型

由于螺杆泵转子转速受到油井的工况和螺杆泵的结构参数等因素的影响,且各因素的作用机制通常不能或无法用精确的数学语言来准确描述,螺杆泵转速预测属于复杂的非线性系统问题。

目前,对于这种问题,常用神经网络方法来解决,BP 神经网络是其常用的方法之一。BP 神经网络具有良好的预测精度、非线性泛化能力、信息处理能力以及学习能力[15-17]。但传统 BP 算法具有学习收敛速度慢,且易陷入局部极小值的缺陷,故本文采用具有更高精度和更快收敛速度的 L-M 算法,来建立螺杆泵转速预测模型。

L-M 算法是把最速下降法和线性化方法即高斯牛顿法加以综合的一种方法,具有减少计算量、网络收敛速度快、精度更高的优势。

L-M 算法的 BP 迭代过程如下:

设 $W(k)$ 表示第 $k$ 次迭代的网络权值向量,维数为 $M$,新的权值向量 $W(k+1)$ 可根据下面的规则求得:

$$W(k+1)=W(k)+\Delta W(k) \tag{1}$$

误差指标函数为:

$$E(W)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}e_i^2(W)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(t_i-o_i)^2 \tag{2}$$

式中:$t_i$—期望输出;$o_i$—实际输出;$N$—输出向量维数。

设 $(W)=[e_1(W),e_2(W)\cdots,e_N(W)]^{\mathrm{T}}$,于是有:

$$\nabla E(W)=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(W)e(W) \tag{3}$$

$$\nabla^2\boldsymbol{E}(W)=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(W)\boldsymbol{J}(W)+S(W) \tag{4}$$

$$S(w)=\sum_{i=1}^{N}e_i(W)\nabla^2e_i(W) \tag{5}$$

式中:$\nabla^2\boldsymbol{E}(W)$—误差指数函数 $E(W)$ 的 Hessian 矩阵;$\nabla E(W)$—梯度;$\boldsymbol{J}(W)$—Jacobian 矩阵。

对于牛顿法,有:

$$\Delta W=-[\boldsymbol{\nabla}^2\boldsymbol{E}(W)]^{-1}\nabla E(W) \tag{6}$$

当接近一个解时,通常有 $S(W)\cong 0$,这时得到高斯-牛顿法的计算规则:

$$\Delta W=-[\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(W)\boldsymbol{J}(W)]^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(W)e(W) \tag{7}$$

L-M 算法是一种改进的高斯-牛顿法,其形式为:

$$\Delta W=-[\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(W)\boldsymbol{J}(W)+\mu\boldsymbol{I}]^{-1}J(W)e(W) \tag{8}$$

式中:$\mu$—比例系数;$\boldsymbol{I}$—单位矩阵。

在实际操作中,$\mu$ 是一个试探性的参数,对于给定的 $\mu$,如果求得的 $\Delta W$ 能使误差指标指数 $E(W)$ 降低,则 $\mu$ 降低;反之,则 $\mu$ 增加。

在采油过程中,螺杆泵的磨损间隙并不能实时测得,但泵的容积效率可以反映出磨损间隙的影响,故本文将采用单隐层的改进 BP 算法,以原油温度、原油黏度、泵端压差、容积效率等 4 个主要因素作为输入层,以转速作为输出层,启动函数选用单极性 sigmoid 函数来建立螺杆泵转速预置模型。

网络模型结构图如图 2 所示。

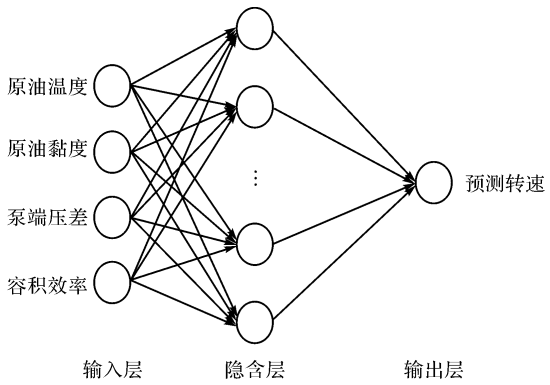


图 2　BP 神经网络模型结构图

通过所建立的螺杆泵转速预测模型,可以得出螺杆泵的实时最优转速。由 PID 控制来调节电机转速达到转速预置的目的。PID 控制包括比例环节 $k_{\mathrm{p}}$、积分环节 $k_{\mathrm{i}}$、微分环节 $k_{\mathrm{d}}$,想要取得良好的控制效果,必须调整好 3 个环节的作用。

笔者采用基于 BP 神经网络的 PID 自适应控制,建立了 $k_{\mathrm{p}},k_{\mathrm{i}},k_{\mathrm{d}}$ 自学习的 PID 控制模型,达到了参数自行调整的目的[18];利用 MATLAB/Simulink 软件搭建了仿真模型,BP-PID 控制模块用 S 函数进行编写。

仿真控制模型如图 3 所示。

图 3 中:左侧第一个模块为数据采集模块,第二个为用已训练好的转速预测模型所搭建的预测模块,后续为 BP-PID 控制模块。

## 3　实验仿真

为验证上述提出的螺杆泵转速预测模型,本文将以 MATLAB 平台为基础,数据采用从油田现场所获得的 200 组经验数据来进行训练和验证。其中,170 组作

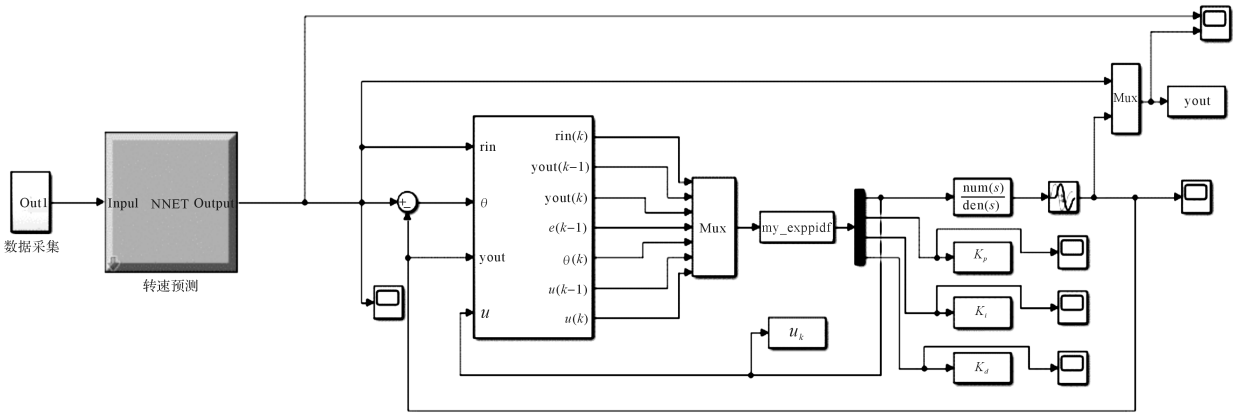


图 3　Simulink 仿真控制模型

为训练数据,30 组作为测试数据。

部分训练数据如表 1 所示。

**表 1　螺杆泵最优转速及其影响因素部分数据**

| 序号 | 原油温度 /℃ | 原油黏度 /(mPa·s) | 泵端压差 /MPa | 容积效率 /(%) | 转速 /(r·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 95.7 | 497 | 7.0 | 83.53 | 270 |
| 2 | 96.0 | 495 | 7.1 | 83.12 | 271 |
| 3 | 96.2 | 493 | 7.2 | 82.64 | 271 |
| 4 | 96.5 | 490 | 7.3 | 82.16 | 271 |
| 5 | 96.8 | 488 | 7.4 | 81.73 | 272 |
| 6 | 97.0 | 486 | 7.5 | 81.24 | 272 |
| 7 | 97.3 | 483 | 7.6 | 80.74 | 272 |
| 8 | 97.6 | 480 | 7.7 | 80.30 | 273 |
| 9 | 97.8 | 478 | 7.8 | 79.79 | 273 |
| 10 | 98.0 | 475 | 7.9 | 79.19 | 272 |

多次实验结果说明,当隐含层节点数选取 11 时,能够取得较好的预测结果,故选用 4－11－1 的神经网络模型。

部分模型预测结果与测试数据的对比如表 2 所示。

**表 2　模型实验最优转速与预测转速误差表**

| 序号 | 实测最优转速 /(r·min$^{-1}$) | 预测转速 /(r·min$^{-1}$) | 相对误差 /% |
|---|---|---|---|
| 1 | 293 | 293.79 | 0.27 |
| 2 | 295 | 296.34 | 0.45 |
| 3 | 297 | 298.57 | 0.53 |
| 4 | 298 | 299.72 | 0.58 |
| 5 | 302 | 300.88 | 0.37 |
| 6 | 305 | 301.64 | 1.10 |
| 7 | 307 | 302.02 | 1.62 |
| 8 | 307 | 307.49 | 0.32 |
| 9 | 307 | 310.56 | 1.09 |
| 10 | 308 | 313.15 | 1.53 |

螺杆泵转速预测结果与测试数据的对比如图 4 所示。

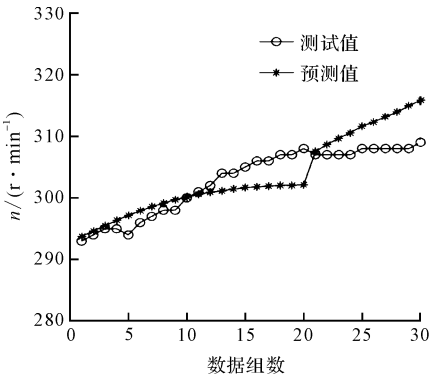


图 4　螺杆泵最优转速预测仿真结果图

经分析 30 组预测数据可知,其平均相对误差为 0.96%,误差绝对值一般分布在 0.001 4 ~ 0.023 0 以内。由此认为,该预测模型收敛效果比较好,具有一定的可靠性。

预测转速输出经 PID 控制后的仿真结果如图 5 所示。

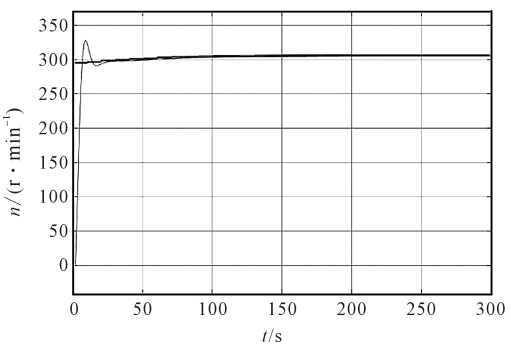


图 5　BP-PID 控制仿真图

由图 5 可以看出,该转速预置具有较好的效果。

## 4　结束语

本文针对螺杆泵转速受制因素的非线性关系,利用神经网络对于非线性关系的良好处理能力,构建了基于 L-M 算法改进 BP 神经网络的螺杆泵转速预测模

型;通过 PID 控制,得到了螺杆泵的转速预置模型。

仿真结果显示:

(1)螺杆泵转速预测模型的预测结果,平均相对误差为 0.96%,误差绝对值一般分布在 0.001 4 ~ 0.023 0以内,具有一定的可靠性;

(2)螺杆泵转速预测结果通过 PID 控制后可以达到良好的预置效果,在潜油螺杆泵采油系统中具有很好的实用性。

该模型可以根据油井中实时测得的原油温度、原油黏度、泵端压差、容积效率等数据来预置该条件下的最优转速,以提高螺杆泵效率和使用寿命。

在后续的实验中,笔者将基于神经网络的 PID 自适应控制,在博图软件中的应用进行研究,之后进行 MATLAB 与博图的对接,以搭建螺杆泵的转速预置平台。

**参考文献(References):**


[1] CLEGG J D, BUCARAM S M, HEINJR N W. Recommendations and comparisons for selecting artificial-lift methods[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1993, 45(12): 1128-1131.

[2] KAHALI K, RAI R, MUKERJIE R K. Artificial lift methods for marginal fields[J]. **SPE Production & Operations**, 1991(4):597-605.

[3] 杨　帆. 潜油螺杆泵市场应用及发展前景[J]. 中国设备工程,2017(8):179-180.

[4] BEAUQAIN J L, BOIREAU C, LEMAY L. Development status of a metal progressing cavity pump for heavy-oil and hot-production wells[J]. **Journal of Petroleum Technology**,2006,58(5):59-61.

[5] KLEIN S. Development of composite progressing cavity pumps[J]. **Proceedings of the Annual Southwestern Petroleum Short Course**,2003(4):74-78.

[6] 胡茂军,王　军,高　原. 螺杆泵井合理转速的确定与应用[J]. 油气田地面工程,2009,28(11):38-39.

[7] 李　聪,王世杰,方　芳,等. 基于 ANN 的 ESPCP 系统转子转速调控技术研究[J]. 机电产品开发与创新,2005,18(21):102-104.

[8] 沈立伟. 多因素耦合作用下 ESPCP 系统控制方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学机械工程学院,2009.

[9] 廖坤梦. 潜油螺杆泵采油技术发展状况及其系统特点[J]. 内蒙古石油化工,2014,40(21):100-101.

[10] 王永昌,郑　贵,胡景新. 螺杆泵试验转速和黏度对水力特性检测的影响[J]. 石油工业技术监督,2009(7):5-9.

[11] 李静龙. 螺杆泵采油效率的影响因素及对策[J]. 化学工程与装备,2020(2):127,132.

[12] 王永昌,杜香芝. 螺杆泵试验转速和温度对水力特性的影响[J]. 石油矿场机械,2011,40(4):65-69.

[13] VANDEVIER J E. Optimum power cable sizing for electric submersible pumps[J]. **Production Operations Symposium**,1987(3):8-10.

[14] 杨秀萍,郭津津. 单螺杆泵定子橡胶的接触磨损分析[J]. 润滑与密封,2007,32(4):33-35.

[15] 韩　军,张　磊,段荣鑫. 基于 BP 神经网络的齿圈装夹变形预测研究[J]. 机电工程,2020,37(6):641-646.

[16] 朱鹏程,吴庆和,陈吉安,等. 基于神经网络与 MATLAB 软件的双折线卷筒参数研究[J]. 机械制造,2019,57(2):49-51.

[17] 李俊铭,吴居豪,何　轩,等. 基于改进 IPSO-BP 算法的 CAM 编程切削参数预测[J]. 机电工程技术,2020,49(5):18-21.

[18] 王建梅,覃文忠. 基于 L-M 算法的 BP 神经网络分类器[J]. 武汉大学学报,2005,30(10):928-931.


[**编辑:**李　辉]


**本文引用格式:**

梁　辉,王世杰,钱　程. 基于改进 BP 神经网络的螺杆泵转速预置模型研究[J]. 机电工程,2021,38(9):1197 - 1201.

LIANG Hui, WANG Shi-jie, QIAN Cheng. Preset model of screw pump speed based on improved BP neural network[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021,38(9):1197 - 1201.