

# 组合方法在往复泵状态预测中的应用

刘文才<sup>1</sup>, 张雪生<sup>2</sup>, 陈 铁<sup>3</sup>, 胡家顺<sup>1</sup>

(1. 中国石油安全环保技术研究院, 北京 102206; 2. 中国石油工程建设公司, 北京 100101;  
3. 龙源风电机工程技术有限公司, 北京 100034)

**摘要:**往复泵是广泛应用于钻井、注水和压裂等工艺中的重要设备,其工作条件十分恶劣。往复泵能否正常运转对油田安全生产十分重要,因此对其易损件,如泵阀、活塞-缸套副、柱塞-密封副等的状态监测和趋势预测,成为往复泵故障诊断的关键问题。笔者主要探讨了往复泵的故障发展趋势,针对其故障诊断与预测的难点,采用组合预测模型进行趋势预测。通过往复泵预测实例分析,对往复泵液力端进行单步和多步预测。

**关键词:**往复泵; 趋势预测; 灰色-神经网络; 故障

中图分类号:X937; TG115. 28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2014)01-0019-05

## Application of Composed Method in Trend Prediction of Reciprocating Pump

LIU Wen-cai<sup>1</sup>, ZHANG Xue-sheng<sup>2</sup>, CHEN Tie<sup>3</sup>, HU Jia-shun<sup>1</sup>

(1. CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing 102206, China;  
2. China Petroleum Engineering & Construction, Beijing 100101, China;  
3. Long Yuan (Beijing) Wind Power Engineering Technology Company Limited, Beijing 100034, China)

**Abstract:** The reciprocating pump which is important equipment in the processes is widely used in drilling, water injection and fracturing. The working condition is severe, so the condition of monitoring and trend prediction of its wearing parts, such as pump valve, piston-cylinder liner and plunger-seal pair become the key problem to the safe operation of reciprocating pumps. This paper researches on fault trend prediction method of reciprocating pump based on gray-neural network, and evaluation of equipment condition using the prediction results. According to fault development trend and difficulties of fault diagnosis and prediction of reciprocating pumps, a combinative prediction model with grey and neural network is selected, which has higher prediction accuracy and the effective degrees of prediction.

**Keywords:** Reciprocating pump; Trend prediction; Grey-neural network; Fault

往复泵是广泛应用于钻井、注水和压裂等工艺中的重要设备,其工作条件十分恶劣,因此对其易损件,如泵阀、活塞-缸套副、柱塞-密封副等的状态监测和趋势预测,成为往复泵安全运行的关键问题。目前单纯的一种预测方法,很难对往复泵的状态进行较为准确的预测,笔者主要采用灰色-神经网络预

收稿日期:2013-06-17

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究院与技术开发资助项目(2011D-4602-0103)

作者简介:刘文才(1984—),男,助理工程师,主要从事设备安全技术工作,动(静)设备检(监)测方向研究。

测方法进行往复泵故障趋势预测,并结合实例展开分析。

### 1 往复泵常见故障分析

高压往复式注水泵主要由动力端、液力端、底座、电机、电控盘、润滑等部件组成<sup>[1]</sup>。由于构成部件多,结构较为复杂,在实际生产中经常发生各种类型的故障,发生部位主要在往复泵动力端和液力端。动力端的转轴和滚动轴承,液力端的阀门、缸套、十字头等零件易出现故障。故障方式包括磨损、松动、窜动等。

## 2 往复泵预测方法

### 2.1 往复泵故障诊断及预测的难点

往复机械(如往复泵)一般都有一组高速往复运动质量,既有旋转运动部件,又有往复运动部件。从而其运动学、动力学形态比旋转机械更复杂,因此对其的故障诊断也比旋转机械困难许多,用单一的预测方法难以在信息贫乏和不确定性条件下对设备运行状态趋势做出准确有效地分析。组合预测方法将各种预测方法的优缺点相互补充,取长补短,有效地利用了全部有用信息,最终达到提高预测精度的目的。但是,组合预测<sup>[2]</sup>方法在机械故障诊断领域内的应用比较少。

### 2.2 灰色-神经网络预测模型

灰色预测模型简单实用,要求样本数据少,能较好地预测振动变化的总体趋势,但不适合逼近复杂的非线性函数,一般用于中长期预测。人工神经网络具有良好的非线性映射能力,能较好地预测振动的波动趋势,但需要具有足够的隐节点,也就是需要大量的样本保证,一般适用于能取得较多样本的短期预测。

#### 2.2.1 并联型组合模型

所谓并联型组合模型是指利用灰色预测模型具有良好的增长特性的特点,对负荷的增长趋势和总体变化趋势进行预测,即对纵向历史数据进行建模;同时利用神经网络预测模型良好的非线性映射能力,对负荷的波动趋势进行预测,即对横向历史数据进行建模;最后根据最优化理论建立兼有两者优点的综合模型。

并联型组合模型对于各自本身的建模程序不需要做太多的修改。但由于两个模型相互独立,所以该综合模型不能消除原来两个模型本身所固有的一些缺点。该模型的流程如图1所示。

#### 2.2.2 串联型组合模型

串联型组合模型能够更大限度地发挥灰色模型和人工神经网络模型各自的特点。所谓串联型组合模型是指将灰色预测模型GM(1,1)的预测结果作为神经网络预测模型的输入,利用神经网络强大的非线性映射功能在其输出端得到精度更高的预测结果,该模型的流程如图2所示。

设  $f_1, f_2, \dots, f_m$  分别为不同数列建模后得到的预测值,则其最终预测值可由下式得到:

$$f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \dots + \lambda_m f_m \quad (1)$$

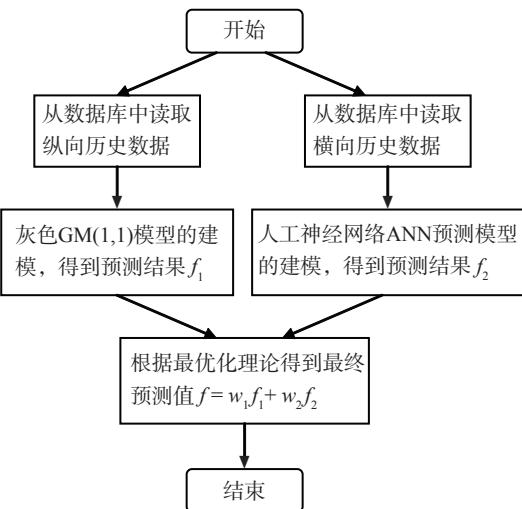


图1 灰色-神经网络并联型组合模型

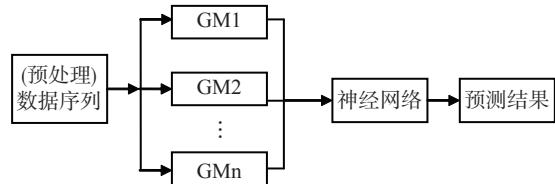


图2 灰色-神经网络串联型组合模型

$$\text{其中 } \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0$$

$\lambda$  为关联系统参数,可用拉格朗日乘数法或其它最优化方法确定。但这种组合预测方法只对权重进行组合,要求参加组合预测方法的误差能保持稳定。但往复泵系统预测结果的误差往往是非均匀性的,因而这种组合校正就存在不足。此时可利用神经网络良好的非线性映射能力对预测区间中的预测值进行最优组合。

选择与预测值最近的  $n$  个已测值作为样本,这  $n$  个已测值就为神经网络的输出,而采用不同的 GM(1,1) 模型对这  $n$  个已测值分别进行预测所得到的结果就为神经网络的输入,对神经网络进行  $n$  次训练。经过训练之后的神经网络,当其输入端为各种 GM(1,1) 模型的预测值时,其输出就为灰色-神经网络组合的预测值。

该组合模型与采用单一方法的预测精度对比分析详见文献[3]。

## 3 往复泵振动特征参数的选取

### 3.1 往复泵振动数据的采集

对新疆塔里木油田某往复式注水泵振动信号进

行现场定期数据采集,采集往复泵各测点(曲轴轴承、十字头、缸套、各进出水阀)上的振动加速度信号。以东河区某注水泵为研究分析对象,各测点布置如图3所示。

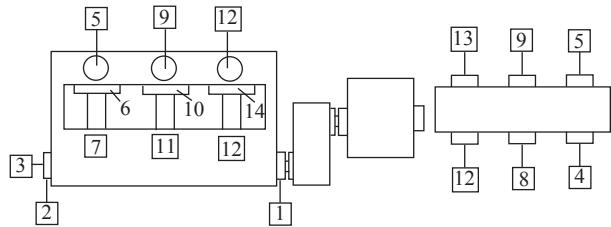


图3 TD-8060注水泵测点分布简图

往复泵振动监测测点说明如表1所示。

表1 往复泵振动测点(三缸)

测点	位置	测点	位置	测点	位置
1	曲轴输入端径向	6	第1缸缸套	11	第2缸十字头
2	曲轴自由端径向	7	第1缸十字头	12	第3缸进水阀
3	曲轴自由端轴向	8	第2缸进水阀	13	第3缸出水阀
4	第1缸进水阀	9	第2缸出水阀	14	第3缸缸套
5	第1缸出水阀	10	第2缸缸套	15	第3缸十字头

文章仅以往复泵液力端为例,对其关键部件(进水阀、缸套)进行状态预测。

### 3.2 往复泵振动信号的特征指标

往复泵的故障(尤其是液力端)大多数是冲击类故障,因此峰-峰值变化很明显。方差指标能反映信号的波动范围,变化也较敏感。而对于绝对平均值和有效值,虽然冲击波峰的振幅大,但持续时间短,作时间平均后,有无峰值的差异几乎表现不出来。它们虽然稳定性好,但对早期故障信号不够敏感。峭度指标、裕度指标、脉冲指标对冲击脉冲类故障比较敏感,特别是当故障早期发生时,它们有明显增加。但上升到一定程度后随着故障的逐渐发展,反而会下降,说明其稳定性不好。

根据往复泵常见故障特点,结合各个指标的稳定性和敏感性,从传统的时域中选择峰-峰值、绝对均值、有效值、脉冲指标、峭度指标作为往复泵预测和诊断的特征指标,并根据不同部件和不同故障确定具体的参数。在往复泵液力端选取绝对均值、峰-峰值、脉冲值、基频幅值作为进水阀、缸套故障的诊断指标。

## 4 往复泵液力端关键部件的预测

### 4.1 故障综合值

#### 4.1.1 故障综合值的确定

故障综合值定义为<sup>[4]</sup>:

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{F}_j \times p_j}{\sum_{j=1}^M p_j} \quad (2)$$

式中: $f_i$  为第  $i$  个部件的故障综合值;  $\bar{F}_j$  为第  $j$  个特征参数与标准值的比值;  $\bar{F}_j = F_j / S_j$ ,  $F_j$  为实测值,  $S_j$  为标准值;  $p_j$  为第  $j$  个特征参数的定量值, 即重要度系数;  $M$  为特征参数的个数。

故障综合值  $f_i$  越大, 则故障程度越严重。由此可以对关键部件进行状态评定和预测。

首先需建立故障综合值的极限值,若故障综合值超过极限值,则表明该部件存在故障。采用对比法,新设备的故障综合值为1,以新设备的故障综合值乘以允许倍数  $q$  作为故障极限值。下面根据液力端故障验证数据,确定各故障特征允许倍数  $q$ ,如表2和3所示。表2,3中的倍数分别表示正常空载/故障空载的值,故障加载/正常加载的值。

表2 进水阀刺漏故障  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 

参数	绝对均值	峰-峰值	脉冲值	基频幅值
正常空载	8.25	119.133	105.126	32.976
故障空载	6.34	65.519	75.108	17.913
倍数	1.3013	1.8183	1.3997	1.8409
$q_1$ 取值	2	2	2	2

表3 盘根漏水故障  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 

参数	绝对均值	峰-峰值	脉冲值
正常空载	5.26	20.793	28.806
故障空载	4.53	20.176	32.431
故障加载	12.49	31.971	48.664
倍数	2.3745	1.53758	1.68937
$q_3$ 取值	3	2	2

由表2中数据,进水阀时域指标、基频幅值均有显著下降,可判定为进水阀刺漏。

由表3中数据,空载下故障设置前后的数据没有明显变化,原因是盘根漏水在空载下表现不明显。对比正常空载和故障加载的数据,可看出其时域指标有显著增加,可判定为盘根漏水。

根据液力端各故障对比表,最终确定各部件故障综合值的极限  $Q_i$  ( $Q_i = \max\{q_i\}, i=1, 2, 3$ )。进水阀  $Q_1=2$ , 缸套  $Q_3=2$ 。此指标将作为往复泵性能评价分级的重要参数。

#### 4.1.2 拟合误差修正

在建立神经网络训练样本时,灰色模型预测的特征参数会有一定误差。而且对于状态监测而言,最关心的是振动特征的增长趋势。当实测值  $X_n > 1.25X'_n$  ( $X'_n$  为  $n-1$  时刻的预测值),表明预测值偏于安全。为了可靠地预测故障,不致漏报故障的发生,需进行  $X_n$  值的修正,使下一个预测值更接近实际,修正公式为:

$$X_n'' = X_n + K_a(X_n - X_n') \quad (3)$$

式中: $K_a$  为大于 0 的常数,取为 0.25; $X_n''$  为修正后的预测值。

同时,当  $X_n' > qS_n > X_n$  时,即预测值比故障极限值还高,而实测值远低于预测值,说明预测值偏高较多,为避免误报故障,进行以下修正,使下一个预测值更接近实际,修正公式为:

$$X_n'' = X_n + L_a(X_n' - X_n) \quad (4)$$

式中: $L_a$  为大于 0 的常数,取为 0.5。

#### 4.2 液力端状态预测

应用灰色-神经网络预测模型,对往复泵液力端关键部件进行各特征指标的预测。分别选取液力端进水阀(测点 4)、缸套(测点 14)作为预测对象,选取绝对均值、峰-峰值、脉冲值作为预测指标。

选取东河区某注水泵 2005 年至 2007 年的振动监测数据,提取各预测指标,进行插值处理,使之成为连续等间距数据(即每间隔一个月一次振动数据),进行多步预测。

##### 4.2.1 进水阀(4 号测点)

(1) 绝对均值预测结果,如表 4 和图 4 所示。表中序号列中的数据按照以下规则对应:2005 年 1 月编为第 1 个月,2005 年 2 月编为第 2 个月,以此

表 4 进水阀(4 号测点)绝对均值预测结果

序号	实际值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	预测值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	误差/ (mm·s <sup>-2</sup> )	相对误 差/%
25	1.622 5	1.792 6	-0.170 1	-10.48
26	2.068 4	2.380 6	-0.312 2	-15.09
27	3.265	3.656 2	-0.391 2	-11.98
28	4.737 4	4.625 8	0.111 6	2.36
29	5.084	6.532 2	-1.448 2	-28.49
30	3.509 2	6.207 9	-2.698 7	-76.90
31	2.567	5.032 7	-2.465 7	-96.05
32	4.449 7	6.100 2	-1.650 5	-37.09
33	6.554	6.396 3	0.157 7	2.41
34	6.009 7	6.234 1	-0.224 4	-3.73

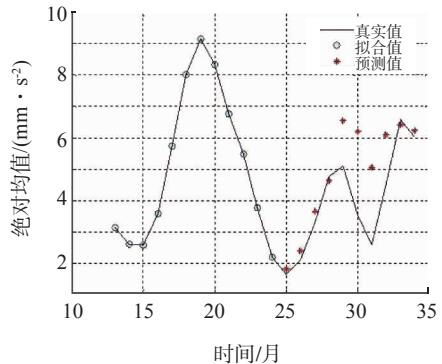


图 4 进水阀(4 号测点)绝对均值预测图

类推,2007 年 10 月数据编为第 34 个月的,表 4 与图 4 即是这种对应关系。下同。

(2) 峰-峰值预测结果,如表 5 和图 5 所示。

表 5 进水阀(4 号测点)峰峰值预测结果

序号	实际值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	预测值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	误差/ (mm·s <sup>-2</sup> )	相对误 差/%
25	17.243 7	30.596 0	-13.352 3	-77.43
26	19.877 7	34.852 3	-14.974 6	-75.33
27	25.206 0	38.187 1	-12.981 1	-51.50
28	32.039 0	40.837 6	-8.798 6	-27.46
29	34.070 0	45.518 4	-11.448 4	-33.60
30	27.431 5	39.893 2	-12.461 7	-45.43
31	23.130 0	33.018 0	-9.888 0	-42.75
32	30.826 5	36.943 8	-6.117 3	-19.84
33	39.927 0	43.398 4	-3.471 4	-8.69
34	38.571 4	41.856 3	-3.284 9	-8.52

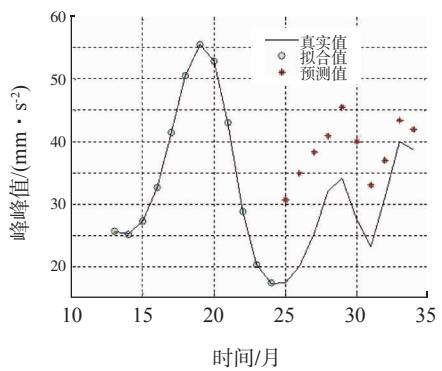


图 5 进水阀(4 号测点)峰峰值预测图

(3) 脉冲值预测结果,如表 6 和图 6 所示。

(4) 计算故障综合值,如表 7 所示。

综上所述,得到结论:预测结果未超出进水阀故障综合值的极限值  $Q_1=2$ ,该部件运行安全,与实际

表 6 进水阀(4号测点)脉冲值预测结果

序号	实际值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	预测值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	误差/ (mm·s <sup>-2</sup> )	相对误 差/%
25	8.7613	7.9418	0.8195	9.35
26	8.5630	8.3246	0.2384	2.78
27	7.7200	8.0314	-0.3114	-4.03
28	6.7507	7.7428	-0.9921	-14.70
29	6.7020	7.8111	-1.1091	-16.55
30	8.1190	8.2062	-0.0872	-1.07
31	9.0100	8.7019	0.3081	3.42
32	7.6719	8.7150	-1.0431	-13.60
33	6.0920	8.3610	-2.2690	-37.25
34	6.4730	8.4792	-2.0062	-30.99

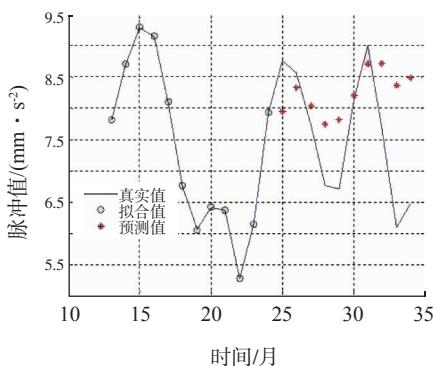


图 6 进水阀(4号测点)脉冲值预测图

表 7 进水阀(4号测点)故障综合值

序号	绝对均值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	峰-峰值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	脉冲值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	预测故障 综合值	实际故障 综合值
25	0.5975	1.2238	1.3236	1.0189	0.8650
26	0.7935	1.3941	1.3874	1.1669	0.9451
27	1.2187	1.5275	1.3386	1.3550	1.1218
28	1.5419	1.6335	1.2905	1.4963	1.3462
29	2.1774	1.8207	1.3019	1.7988	1.4135
30	2.0693	1.5957	1.3677	1.7049	1.2012
31	1.6776	1.3207	1.4503	1.4934	1.0721
32	2.0334	1.4778	1.4525	1.6785	1.3406
33	2.1321	1.7359	1.3935	1.7818	1.6429
34	2.0780	1.6743	1.4132	1.7474	1.5763

注:绝对均值的正常状态值为  $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重要度系数为 0.75;峰-峰值的正常状态值为  $25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重要度系数为 0.65;脉冲值的正常状态值为  $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重要度系数为 0.6。

运行基本相符。

#### 4.2.2 缸套(14号测点)

同样,选取绝对均值、峰-峰值、脉冲值作为预测指标,得到故障综合值,如表 8 所示。

表 8 缸套(14号测点)故障综合值

序号	绝对均值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	峰-峰值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	脉冲值/ (mm·s <sup>-2</sup> )	预测故障 综合值	实际故障 综合值
25	1.0184	1.0033	1.2693	1.0854	0.9813
26	1.3700	1.0057	1.2338	1.2183	1.0602
27	1.6208	1.0731	1.2119	1.3344	1.1842
28	1.7583	1.1152	1.1687	1.3908	1.3309
29	1.8128	1.2318	1.1340	1.4390	1.3534
30	1.6394	1.3007	1.0857	1.3764	1.1768
31	1.5468	1.3993	1.0904	1.3707	1.1410
32	1.5901	1.5605	1.0645	1.4308	1.5154
33	1.8628	1.8981	0.9996	1.6271	1.8736
34	2.0873	2.3070	0.9358	1.8263	1.7667

注:绝对均值的正常状态值为  $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重要度系数为 0.75;峰-峰值的正常状态值为  $25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重要度系数为 0.65;脉冲值的正常状态值为  $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重要度系数为 0.6。

可以得到结论:预测结果未超出缸套故障综合值的极限值  $Q_3=2$ ,该部件运行安全,与实际运行基本相符。

## 5 结语

主要探讨了往复泵故障趋势预测的方法,结合状态监测项目开展了往复泵状态预测工作。基于对塔里木油田某注水泵历史数据的分析,应用灰色-神经网络组合法实现了对其状态的预测。实践证明,该方法预测精度较高,在状态监测工作当中有非常好的应用价值和实际意义。

## 参考文献:

- [1] 张文坤. 基于神经网络的状态预测技术及其在给水泵中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2004, 2: 26-28.
- [2] 唐小我. 组合预测方法研究[J]. 控制与决策, 1993, 8(1): 7-11.
- [3] 刘文才, 陈铁. 基于灰色-神经网络的往复泵状态监测和趋势预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(1): 79-84.
- [4] 段礼祥, 王福善. 基于复合指标的往复泵柱塞-缸套磨损故障诊断[J]. 石油机械, 2006, 34(10): 52-55.