基于 VMD 和 SVM 的减速机滚动轴承状态辨识研究*

张利强[1,3]，秦绍军[2]，秦　波[3]，赵少勇[1]

（1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司设备工程部，内蒙古 包头　0104010；
2. 河南省镇平县电视台，河南 镇平　474250；
3. 内蒙古科技大学机械工程学院，内蒙古 包头　014010）

摘　要： 针对长材厂棒材作业区轧机减速机滚动轴承振动信号呈现“非线性”、“非平稳”的特点，造成其故障特征“难提取”，致使据此构建的 SVM 状态辨识模型分类“精度差”的问题，提出一种基于 VMD 和 SVM 的滚动轴承状态辨识方法。实验及案列分析结果表明：能够准确、有效地提取滚动轴承的故障特征信息实现其状态辨识，为现场应用提供了一种新方法。

关键词： 减速机；滚动轴承；变分模态分解；支持向量机；状态辨识
中图分类号： TH17　　**文献标识码：** B　　**文章编号：** 1009－5438(2020)01－0063－04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.01.018

Condition Recognition Study on Rolling Bearing for Reducer Based on VMD and SVM

Zhang Li－qiang[1,3], *Qin Shao－jun*[2], *Qin Bo*[3], *Zhao Shao－yong*[1]

(1. *Equipment Engineering Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Zhenping Television Station, Zhenping* 474250, *Henan, China*;
3. *School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The characteristics of vibration signals for the rolling bearing of reducer of rolling mill in the bar work zone of Long Products Plant are non－linear and non－stationary so that the fault feature is difficult to be extracted. As a result, the classification of the SVM condition recognition model established based on this is with the problem of poor precision, so a method for condition recognition of rolling bearings based on VMD and SVM is proposed. The experimental and case analysis results showed that the fault feature information of rolling bearing could be accurately and effectively extracted to realize its condition recognition, which provides a new method for field application.

Key words: reducer; rolling bearing; variational mode decomposition; support vector machine; condition recognition

滚动轴承是钢铁企业减速机的关键部件，其服　役在高温、多粉尘恶劣环境中，且频繁启停、加减速

* 收稿日期：2019－05－10
基金项目：获内蒙古自然科学基金面上项目(2017MS0509)部分资助。
作者简介：张利强(1974－)，男，内蒙古包头市人，硕士，高级工程师，现从事设备运行管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

及工作负载多变，极易受损出现故障，势必导致减速机甚至整条生产线停产，造成经济损失的同时引发重大生产安全事故。因此，对滚动轴承等减速机关键部件采取行之有效的特征提取以及状态辨识方法，对保障“炼铁－炼钢－轧钢”生产过程安全、高效运行，具有重要的意义。

1 滚动轴承振动信号的特征提取

棒材减速机滚动轴承振动信号特征提取的流程：首先，获取滚动轴承的振动信号；其次，将上述信号经变分模态分解，获取若干个窄带模态分量；最后，计算其能量熵和排列熵来构建高维特征向量集。

1.1 变分模态分解

变分模态分解[1]（Variational Mode Decomposition，VMD）算法将待分解信号转移到变分框架内，通过搜寻约束变分模型最优解；其中，每个模态分量的中心频率和带宽不断地相互交替迭代更新，最终完成信号频带的自适应剖分，得到若干窄带模态分量。

1.2 能量熵和排列熵

VMD分解后计算得到各窄带模态分量的能量 $E_1, E_2, \cdots, E_n$。由此可以得到能量熵[2]的定义：

$$H_E = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log p_i \tag{1}$$

式中，$p_i = E_I / E$ 表示第 i 个本征模式分量能量在总能量中的比重。

减速机滚动轴承信号的运行状态不同，其能量熵值也不同。由于各个IMF分量又包含不同的频率成分，且具有不同的能量。可通过构建特征向量集能量熵分量 $H_{E_1}, H_{E_2}, \cdots, H_{E_n}$ 作为模式识别的输入。

排列熵[3]是通过对比相邻数据的大小，来检测时间序列的动力学突变，而数据的具体值不参与运算，从而可以有效地避免噪声的干扰和降低计算的复杂性。其定义如下：

$$H_p(D) = -\frac{1}{\ln(D!)} \sum_{\pi_j \in S_D} p(\pi_j) \ln(p(\pi_j)) \tag{2}$$

由式(2)可知，排列熵可以反应时间序列的局部特征：$H_p(D)$ 越小，时间序列就越规则，$H_p(D)$ 越大，时间序列就越不规则，或随机性越大。故排列熵可用来度量时间序列的复杂性和检测动力学突变的指标。可通过构建特征向量集排列熵分量 $P_{E_1}, P_{E_2}, \cdots, P_{E_n}$ 作为模式识别的输入。

2 滚动轴承状态辨识模型构建

与人工神经网络相比，支持向量机[4]（Support Vector Machine，SVM）因其具有范化能力强、小样本学习、全局解唯一等优点被常用于构建传动系统关键部件智能诊断模型。其构建模型的流程如图1所示。

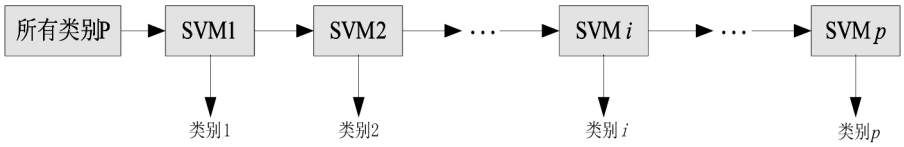


图1 SVM模型分类模型构建流程

3 实验及案例分析

为验证所提算法有效性，基于SIEMENS－LMS Test. Lab多通道数据采集仪和美国Spectra Quest公司的DDS动力传动故障诊断综合实验台搭建测试系统。试验中，采集美制ER－12K圆柱滚子轴承的内圈故障、外圈故障、滚动体故障3种状态下振动信号，采样频率15 360 Hz，电机转速2 100 r/min，各状态采集60组数据。搭建测试系统见图2。

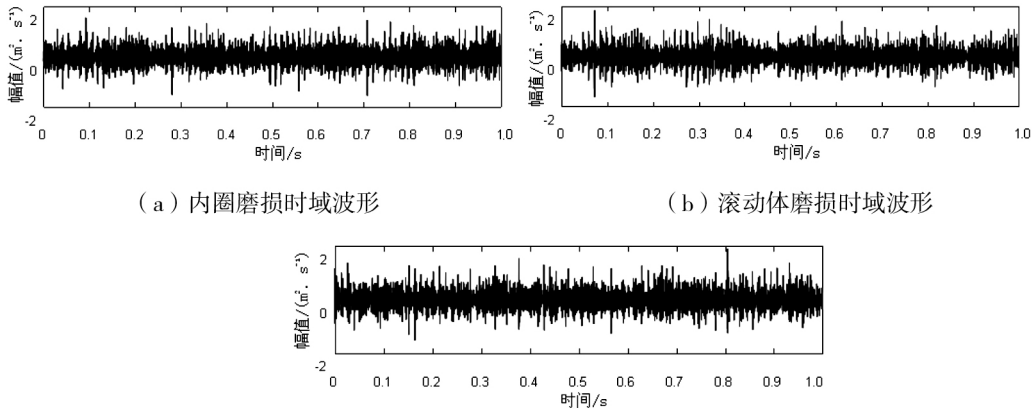


图2 搭建测试系统

中国知网 https://www.cnki.net

将 3 种状态下滚动轴承振动信号的前 40 组数据作为训练样本，输入到 SVM 算法进行训练，建立滚动轴承的故障诊断模型；然后利用后 20 组数据作为测试样本完成测试。通过对分类结果分析，SVM 模型对于滚动轴承故障的总分类精度达到了 97.5%，其中滚动体故障识别率为 100%，内圈故障和外圈故障的识别率为 95%，表明了所提方法对滚动轴承状态辨识的有效性。

同理，利用包钢设备检测诊断信息管理系统对长材厂棒材作业区 6V 轧机减速箱型号为 97526E 的滚动轴承 8—10 月各测点振动的波形及数据，来验证算法有效性。其中内圈磨损、滚动体磨损、外圈磨损故障的时域波形如图 3 所示。



（a）内圈磨损时域波形　　（b）滚动体磨损时域波形

（c）外圈磨损时域波形

图 3　现场减速机滚动轴承故障时域波形图

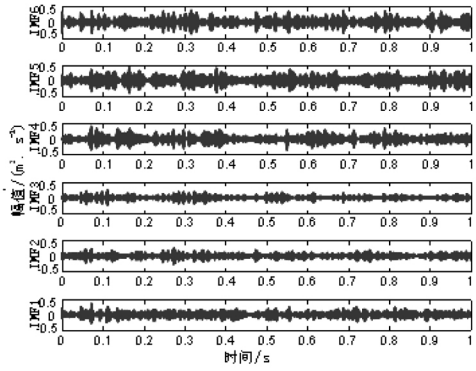
为了提高滚动轴承状态辨识模型精度，分别截取上述 60 组长度为 5120 的时域波形数据，通过 SVM 算法的学习来构建减速机滚动轴承状态辨识模型。首先，对上述数据进行 VMD 分解，分解层数为 6，结果如图 4 所示。

对图 4 中所示的各组信号的 IMF 分量分别计算其能量熵和排列熵作为基于 SVM 构建滚动轴承状态辨识模型的特征向量集，计算结果见表 1。

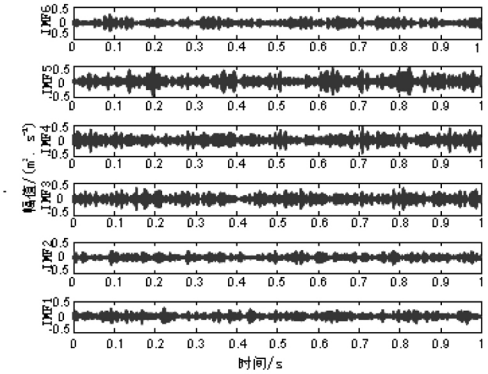
表 1　现场减速机滚动轴承特征向量集

轴承状态	样本序号	HE_1	HE_2	…	HE_6	PE_1	PE_2	…	PE_6
内圈磨损	1	0.613 14	0.608 19	…	0.586 55	0.872 73	0.850 21	…	0.823 62
	2	0.623 50	0.613 94	…	0.579 43	0.863 25	0.860 67	…	0.819 48
	…	…	…		…	…	…		…
	60	0.602 45	0.596 89	…	0.563 78	0.853 17	0.843 94	…	0.817 76
滚动体磨损	1	0.687 31	0.667 55	…	0.587 42	0.862 16	0.853 02	…	0.802 03
	2	0.657 55	0.654 36	…	0.568 80	0.847 95	0.832 52	…	0.803 20
	…	…	…		…	…	…		…
	60	0.665 35	0.648 22	…	0.578 05	0.863 39	0.851 01	…	0.792 35
外圈磨损	1	0.568 31	0.556 55	…	0.566 42	0.853 16	0.831 02	…	0.789 03
	2	0.578 85	0.548 36	…	0.545 80	0.820 95	0.813 68	…	0.756 20
	…	…	…	…	…	…	…		…
	60	0.552 37	0.532 32	…	0.523 05	0.819 59	0.802 01	…	0.747 35

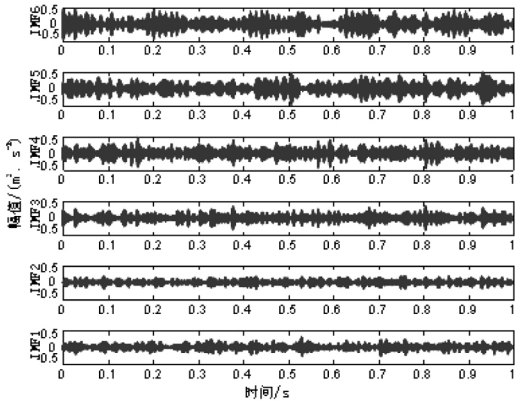
中国知网　https://www.cnki.net



（a）内圈磨损 VMD 分解



（b）滚动体磨损 VMD 分解



（c）外圈磨损 VMD 分解

图4 现场减速机滚动轴承 VMD 分解

将特征向量集输入训练好的 SVM 辨识模型之中，诊断轴承的故障类型，分类结果如图 5 所示。图中“1”代表内圈磨损，“2”代表滚动体磨损，“3”代表外圈磨损。由图 5 可知，80.85% 的数据点集中在“1”内圈磨损中，说明减速机中可能发生了内圈磨损故障。

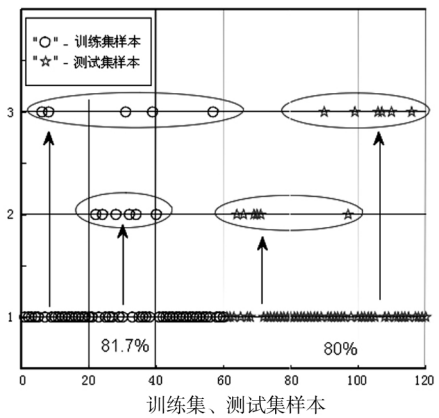


图5 基于 SVM 的现场减速机滚动轴承状态辨识

2018 年 11 月，对长材厂的 6V 轧机减速机进行定检，拆机后观察发现内圈磨损，与上述状态辨识模型判定结果一致，表明所提方法对现场减速机滚动轴承状态辨识有效。

4 结论

（1）VMD 算法能有效地提取淹没在强噪声背景下“非线性”、“非平稳”的滚动轴承特征信息。

（2）能量熵与排列熵更好的从不同角度来表征滚动轴承的各个状态。

（3）试验及案例分析表明，基于 SVM 的滚动轴承状态辨识模型具有优良的分类精度，能够准确、有效地实现其状态辨识，为现场应用提供了一种新方法。

参 考 文 献

[1] 秦波，王祖达，郭慧莉，等. 基于 VMD 和对称差分能量算子解调的滚动轴承故障诊断方法[J]. 机械传动，2017，41(05)：143－147.

（下转第 94 页）

中国知网 https://www.cnki.net

4 结束语

以上施工方法是我们针对企业生产实际，根据现场情况确定治漏的简单实用且造价低廉的方法。对其它介质管道类似漏点也有相同的适应性。我们先后对该厂直径600 mm高炉煤气管道焊缝泄漏和直径800 mm转炉煤气管道用类似方法进行了处理，堵漏效果均不错。采用上述临时堵漏方法，既省时省力，又相对经济实惠，安全性也能满足要求，值得同行们探讨、推广和使用。

参 考 文 献

[1] 姚在桐，温洪钡. 带压堵漏技术问答 [M]. 北京: 中国石化出版社，2002.
[2] 赵良. 带压堵漏技术实例 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社，2007.

(上接第66页)

[2] 张鲁洋，秦波，尹恒，等. 基于ELMD能量熵与AFSA－SVM的行星齿轮箱关键部件故障诊断研究 [J]. 机械传动，2018，42(06)：164－170.
[3] 郑近德，程军圣，杨宇. 多尺度排列熵及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 中国机械工程，2013，(19)：2641－2646.
[4] 丁世飞，齐丙娟，谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述 [J]. 电子科技大学学报，2011，40(1)：2－10.

欢迎订阅《包钢科技》杂志

邮发代号: 16－151　　**定价:** 90元/年

地　　址: 内蒙古包头市昆区河西工业园区包钢技术中心《包钢科技》编辑部

邮　　编: 014010

联系电话: 0472－2186065　　0472－2183081

联 系 人: 安琪

《包钢科技》编辑部

中国知网 https://www.cnki.net