

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.002

# 基于故障敏感分量和改进 K 近邻分类器的故障状态识别

王化玲<sup>1</sup>, 刘志远<sup>2</sup>, 赵欣洋<sup>2</sup>, 晁战云<sup>3</sup>, 刘小峰<sup>4</sup>

(1. 国网智能科技股份有限公司, 济南 250101; 2. 国网宁夏电力有限公司检修公司, 银川 750011;  
3. 华通科技有限公司, 重庆 400112; 4. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 针对故障状态下的滚动轴承振动信号非线性非平稳性强、噪声干扰大导致的故障敏感特征提取难的问题, 在对轴承振动信号进行局域均值分解(local mean decomposition, LMD)的基础上, 提出了一种基于故障敏感分量的特征提取与改进 K 近邻分类器(K-nearest neighbor classifier, KNNC)的故障状态辨识方法。该方法采用相关系数法对 LMD 分解出的振动分量进行故障敏感性的量化表征, 然后对筛选出的信号分量进行时域/频域的特征提取, 构建不同故障状态下的特征样本集。为加快故障状态识别速度, 排除不良样本的影响, 提出一种基于二分 K 均值聚类的改进 KNNC 算法, 精简了大容量的训练样本, 有效去除不良特征样本和干扰点。实验结果表明, 以敏感分量特征作为输入的改进 KNNC 算法能够快速准确地识别轴承不同故障状态。

**关键词:** 局域均值分解; 故障敏感分量; 改进 K 近邻分类器; 故障诊断

**中图分类号:** TH17; TH206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2020)12-033-08

## Fault state identification method based on fault sensitive components and improved KNNC

WANG Hualing<sup>1</sup>, LIU Zhiyuan<sup>2</sup>, ZHAO Xinyang<sup>2</sup>, CHAO Zhanyun<sup>3</sup>, LIU Xiaofeng<sup>4</sup>

(1. State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan 250101, P. R. China;  
2. Overhaul Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, P. R. China;  
3. Huatong Technology Co., Ltd., Chongqing 400112, P. R. China; 4. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** To solve the problem of sensitive feature extraction from the non-stationary and nonlinear vibration signals of rolling bearing, local mean decomposition (LMD) was carried out. and the time/frequency domain features were extracted from the sensitive fault components quantified by the correlation coefficient method. Then, the feature sets of different faults states were established and used to train the state classifier. In order to achieve the higher accuracy of bearing fault states identification, an improved K-nearest neighbor classifier (KNNC) algorithm based on dichotomy K-means clustering was proposed, in which the big training samples were simplified, and the bad samples and interference points were effectively removed. Finally, the effectiveness of the method was verified through diagnostic analysis of experimental

收稿日期: 2019-07-17 网络出版日期: 2020-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675064, 51975067)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51675064, 51975067).

作者简介: 王化玲(1985—), 女, 高级工程师, 主要从事自动控制与检测研究。

通讯作者: 刘小峰, 女, 重庆大学教授, 主要从事虚拟仪器、工程信号处理、设备故障检测与诊断研究, (E-mail) liuxfeng0080@126.com。

data of bearings.

**Keywords:** local mean decomposition; fault sensitive component; improved K-nearest neighbor classifier; fault diagnosis

滚动轴承广泛应用于国民经济和国防事业的各个领域,不管在大型机械设备上(如航空转子系统、舰船传动系统等),还是在小型自动控制机构上(如驱鸟自动装置、电站巡检机器人等)都是十分重要的机械基础件。特别是对于长期在恶劣工况环境下运行的机械或机器人系统,其轴承部件受风沙、雨雪、酷暑和严寒等自然条件及自身运行震动、遇障冲击、爬行、横移等外界因素影响很大,容易出现故障状态,其故障状态的自动识别对于保证其正常运行,延长其使用寿命起着至关重要的作用。

由于机器人或机械系统在服役过程中的工况复杂多变,其轴承的振动信号是典型的非线性和非平稳信号,通常包含多个低频谐波、高频冲击、干扰噪声等多个信号分量,使得故障特征信息难以被有效提取出来<sup>[1-2]</sup>。如何有效地从多分量振动信号中提取敏感特征分量进行智能状态识别对提高轴承服役状态的可靠性,保证机器人或机械机构的正常运行具有重要意义。轴承的故障类型较多,具有不确定性,常采用多域多指标进行故障状态的表征。对用高维度输入的人工智能状态识别方法(BP 网络<sup>[3]</sup>、支持向量基<sup>[4]</sup>、卷积神经网络<sup>[5]</sup>等),往往面临着网络参数的选择困难,网络结构优化难、运算速度慢、易陷入局部最优等问题。特征聚类法是一种基于统计学的模式识别方法,无须进行参数的设置与结构设计,具有对样本要求低,时效性强的优点。

目前,广泛用于轴承故障状态识别的特征聚类方法有层次聚类、密度聚类、网格聚类、模型聚类及最近邻分类器(K-nearestneighborsclassifier,KNNC)等。层次聚类算法可伸缩性差,输出结果为聚类树,无聚类中心概念,因此不适用于样本精简<sup>[6]</sup>。密度聚类算法容易造成密度较小的聚类被划分为多个类或密度较大且离得较近的聚类被合并成一个类<sup>[7]</sup>。而网格聚类算法只能用于边界是水平或垂直的聚类,不能检测斜边界,且不适用于高维数据<sup>[8]</sup>。模型聚类算法需要找到与给定数据相适应的数学模型。划分聚类算法通常需要事先确定聚类数目和初始化聚类中心。KNNC 聚类方法能直接利用训练样本的局部信息与类标签信息对测试样本分类决策,训练过程简单,分类特性好,在轴承的故障模式识别得到了广泛的应用<sup>[9-10]</sup>。要说明的是,传统的 K 均值聚类需要输入聚类数 K,且随机选择 K 个初始聚类中心易导致初始聚类中心过于邻近而大大增加迭代过程复杂度,影响输出结果质量。因此,笔者采用改进的二分 K 均值聚类算法对轴承故障敏感分量的特征训练样本进行精简,从而克服了处理大容量训练样本时间长的缺点,降低了不良样本与干扰点的影响。

## 1 故障敏感分量提取

局部均值分解(local mean decomposition, LMD)旨在将原始信号分解为若干个乘积函数(product function, PF)的线性组合,各 PF 分量表示了轴承振动信号中自高频到低频的频率成分,然而仅部分 PF 分量与轴承故障密切相关,因此需要对敏感 PF 分量进行筛选。设正常状态下振动信号为  $x_{\text{norm}}(t)$ ,被分析状态下振动信号为  $x(t)$ ,笔者基于两类相关系数对  $x(t)$  的敏感 PF 分量进行选取,即  $x(t)$  与其各 PF 分量的相关系数和  $x_{\text{norm}}(t)$  与  $x(t)$  各 PF 分量的相关系数,具体选取步骤如下:

- 1) 计算信号  $x(t)$  与其 PF 分量  $P_i (i=1, 2, \dots, L)$  间的相关系数  $\alpha_i$ 。
- 2) 计算信号  $x_{\text{norm}}(t)$  与  $x(t)$  各 PF 分量  $P_i$  间的相关系数  $\beta_i$ 。
- 3) 定义并计算  $x(t)$  的第  $i$  个 PF 分量  $P_i$  的敏感系数

$$\gamma_i = \alpha_i - \beta_i. \quad (1)$$

- 4) 依据敏感系数大小对信号  $x(t)$  各 PF 分量进行重排,得到新 PF 序列  $\{P'_i\}$ , 且满足  $\gamma'_1 \geq \gamma'_2 \geq \dots \geq \gamma'_L$ 。
- 5) 计算新序列  $\{P'_i\}$  中相邻两 PF 分量的敏感系数的差值

$$d_i = \gamma'_1 - \gamma'_i. \quad (2)$$

6) 找到  $d_i$  最大值所对应序号  $\lambda$ , 则序列  $\{P'_i\}$  中前  $\lambda$  个 PF 分量为敏感 PF 分量。

$x(t)$  与其分量  $P_i$  间的  $\alpha_i$  反映了  $P_i$  相对于  $x(t)$  的重要程度。 $\beta_i$  可反映分量  $P_i$  是否与  $x_{\text{norm}}(t)$  中某频率成分相对应, 显然, 当  $P_i$  为由故障引起的频率成分时, 由于  $x_{\text{norm}}(t)$  不含有与  $P_i$  相对应的频率成分,  $\beta_i$  接近于零; 当  $P_i$  为正常信号频率时, 由于该频率成分存在于不同状态振动信号中, 故  $\beta_i$  取值较大。敏感系数  $\gamma_i$  综合考虑  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  的影响, 当且仅当  $P_i$  为  $x(t)$  的主要频率成分且  $x_{\text{norm}}(t)$  不含有与  $P_i$  相对应的频率成分时,  $\gamma_i$  取值较大。因此, 敏感系数  $\gamma_i$  可作为信号  $x(t)$  中敏感 PF 分量选取的依据。按照上述方法选取敏感 PF 分量后, 对所选敏感 PF 分量进行叠加重构, 并提取重构信号的均值、最大值、最小值、歪度、峭度、方差、方根幅值、绝对平均幅值、均方根值、峰峰值、波形指标、脉冲指标、峭度指标、峰值指标、裕度指标和偏斜度指标共计 16 个指标组成特征向量。

## 2 改进的 KNNC 算法

KNNC 以各样本的质心为代表不断迭代, 从训练样本集中搜索与待分类数据点  $d$  最近的  $K$  个邻域样本, 并以这  $K$  个样本的类标签来决策  $d$  的类别<sup>[11]</sup>。为了弥补 KNNC 算法训练时间较长, 易受不良样本影响的缺点, 提高故障特征的聚类辨识度, 笔者对随机选择初始聚类中心和收敛条件进行改进, 提出一种基于二分  $K$  均值聚类的改进算法, 具体步骤如下:

1) 找到样本数据集相距最远的 2 个点。传统的算法要从数据集中选出相距最远的数据对需要比较两两之间的距离, 其时间复杂度是  $O(n^2)$ , 计算量很大, 为了降低复杂度, 采用如下算法计算。首先从数据集  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  中随机选取数据点  $x_i$ , 按式 (3) 计算  $x_i$  与所有点之间的距离  $d(x_i, x_j)$ , 其中  $j = (1, 2, \dots, n)$ , 并找到距  $x_i$  最远的点  $x_j$ , 然后计算  $x_j$  与所有点之间的距离  $d(x_j, x_k)$ , 其中  $k = (1, 2, \dots, n)$ , 找出距  $x_j$  最远的点  $x_k$ , 则  $x_j, x_k$  为整个数据集相距最远的 2 个点。

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_i^l (x_i - x_j)^2}, \quad (3)$$

式中  $l$  为向量空间维数。

2) 以相距最远的 2 个点为初始聚类中心, 用传统的  $K$  均值聚类方法进行聚类, 直到满足  $K$  均值聚类的收敛条件为止。以  $t$  表示循环次数, 则样本数据集被聚类为  $t+1$  个簇。

3) 按照式 (4) 分别计算以上聚类簇的误差平方和  $E_{t1}, E_{t2}, \dots, E_{t(t+1)}$ , 并把所有簇的误差平方和相加得到  $S_t(t+1)$ 。

$$E = \sum_{j=1}^N \sum_{x \in C_j} \|x - m_j\|^2, \quad (4)$$

式中:  $N$  为聚类数目;  $C_j (j = 1, 2, \dots, N)$  为聚类第  $j$  个簇,  $x$  为簇  $C_j$  中任意数据样本;  $m_j$  为簇  $C_j$  的均值。

4) 设  $\epsilon = S_{t(t+1)} - S_{(t-1)t}$  (初始化  $S_{01} = 0$ ), 若  $\epsilon > \Delta$  ( $\Delta$  为收敛预设阈值), 则以误差平方和最大的簇替换样本数据重复步骤 1)~3), 否则, 结束循环, 输出聚类结果。

5) 找出离  $t+1$  个聚类中心最近的数据点组成精简的训练样本, 再输入到 KNNC 算法进行训练。

上述改进的 KNNC 算法, 以相距最远的 2 个点为初始聚类中心, 执行了多次二分实验并选择具有最小的簇聚类误差平方和的试验结果, 每步只有 2 个质心, 不但精简了大容量的训练样本, 还能有效去除不良样本和干扰点。

## 3 基于故障敏感分量和改进 KNNC 的轴承故障诊断方法

笔者基于 LMD 算法分解轴承振动信号, 参考轴承正常状态下的振动信号, 选取故障敏感 PF 分量进行故障特征提取, 然后利用改进的 KNNC 算法实现轴承故障识别, 其故障诊断模型如图 1 所示, 具体步骤如下:

- 1) 对采集的轴承振动信号分别进行 LMD 分解。
- 2) 依据第 2 节方法, 选取与故障信号分量相关的敏感 PF 分量, 并叠加选取的所有敏感 PF 分量以重构信号。
- 3) 从重构信号中提取第 2 节所述信号的特征向量。
- 4) 以 3) 中所提取的特征向量分别作为训练样本和测试样本, 然后利用改进的二分 K 均值聚类算法对训练样本进行精简。
- 5) 将精简后的训练样本和测试样本输入 KNNC, KNNC 根据训练样本的邻域信息和类标签信息对测试样本进行状态辨识。

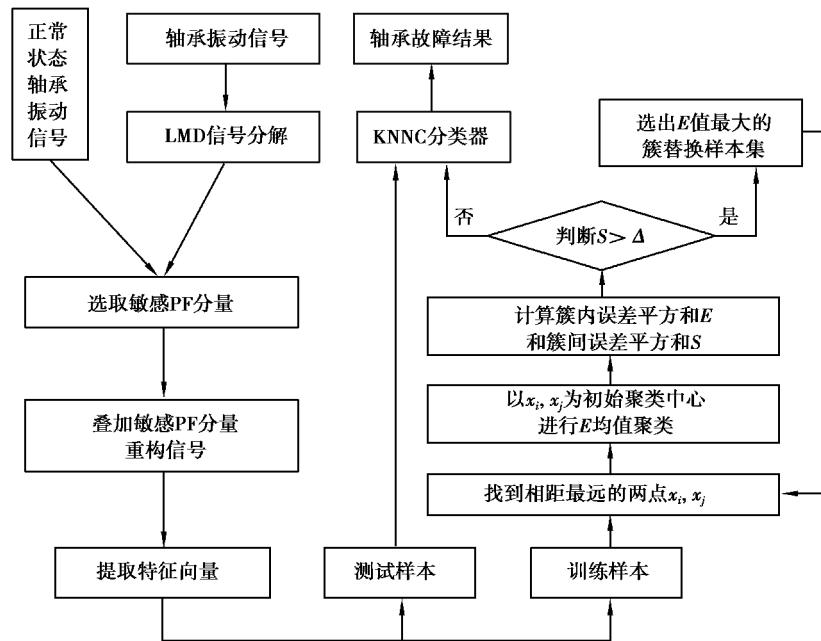


图 1 算法结构框图

Fig. 1 structure frame of algorithm

## 4 实验验证

为了验证本文方法的有效性, 采用文献[12]滚动轴承振动数据进行实例分析。实验中采用 6205-2RS 型深沟球轴承, 通过人工引入不同类型及不同程度的轴承单点模拟故障。在电机转速 1 772 r/min, 负载 0.736 kW 的工况下, 测取 5 种不同故障状态(内圈故障、0.18 mm 外圈故障、0.36 mm 外圈故障、0.53 mm 外圈故障和滚动体故障, 分别记为 S1→S5)轴承振动信号, 并测取正常轴承振动信号一组作为参考信号。取不同故障状态下振动信号各 100 组, 随机抽取其中 80 组数据作为训练样本, 剩余的 20 组数据作为测试样本, 使用前 2 048 个数据采样点进行分析。为强化振动信号中故障特征分量, 对各信号进行 LMD 分解, 并对敏感 PF 分量进行选取以重构原信号。图 2(a)和(b)分别为 0.36 mm 外圈故障振动信号及其频谱, 图 2(c)~(h)给出了该信号 LMD 分解所得前 6 个 PF 分量( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ )的频谱。从图 2 中分量频谱与原信号频谱的对比可知, LMD 可有效分离原信号中的各主要频率成分。依据式(1)计算出图 2 中各 PF 分量( $P_1 \rightarrow P_6$ )的敏感系数  $\gamma$  分别为 0.740, 0.830, 0.230, 0.170, 0.040, -0.007。

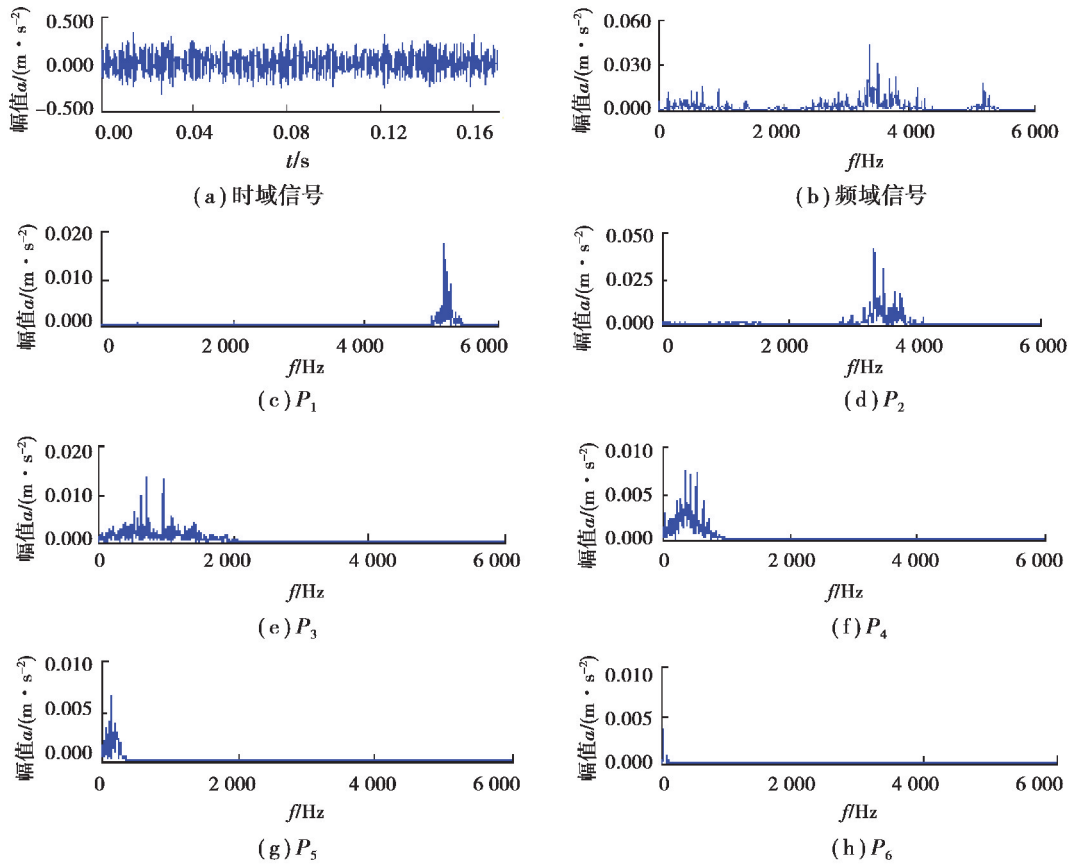


图 2 0.36 mm 外圈故障信号及其 PF 分量频谱

Fig. 2 0.36 mm outer ring fault vibration signal and its PF components

图 3 给出 0.36mm 内圈故障信号重排 PF 序列  $\{P'_i\}$  的敏感系数,由于  $P'_2$  与  $P'_3$  间敏感系数具有最大差值,故敏感系数最大的前 2 个 PF 分量(即图 2 中所示  $P_2, P_1$ )为敏感 PF 分量,分别与外圈故障信号中 2 个故障冲击高频成分相对应。因此,基于 LMD 敏感 PF 分量的选取方法能有效分离轴承故障相关频率成分,强化信号故障特征信息。对训练样本和测试样本各信号分别进行敏感 PF 分量的选取,并以此重构信号和从重构信号中提取特征向量用于后续故障状态识别。

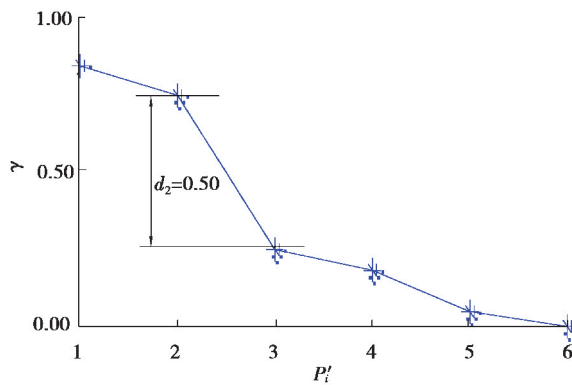


图 3 按照敏感系数重排 PF 顺序

Fig. 3 Reorder PF by sensitive coefficient

为了验证本文方法的有效性,实验对比了 4 种不同故障诊断方法,分别记为“PF 选取-特征提取-优化 KNNC”,“特征提取-优化 KNNC”,“小波分解-特征提取-优化 KNNC”和“PF 选取-特征提取-KNNC”,对应的编号分别为“A”“B”“C”“D”。方法“A”为笔者所提基于敏感 PF 分量特征提取并通过改进的 KNNC 算法进行模式识别;方法“B”为从原始振动信号中直接提取第 2 节所述时域统计特征;方法“C”为采用 db4 小波对原信号进行 3 层小波分解,从小波分量中提取上述方法相同的特征作为输入;方法“D”为将笔者提出的敏感分量特征输入到传统的 KNNC 中得的分类结果。

表 1 不同诊断模型分类性能对比

Table 1 Comparison of different diagnosis model's performance

编号	诊断方法	识别精度/%					
		试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	平均
A	PF 选取-特征提取-优化 KNNC	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00	0.99
B	特征提取-优化 KNNC	1.00	1.00	0.90	1.00	0.95	0.97
C	小波分解-特征提取-改进 KNNC	1.00	1.00	0.95	1.00	0.95	0.98
D	PF 选取-特征提取-传统 KNNC	1.00	1.00	0.95	1.00	0.95	0.98

由表 1 的比较结果可以看出,基于 4 种故障诊断方法均能较为准确地识别出滚动轴承状态。对比方法“A”与“B”的结果易知,基于 PF 分量的特征提取降低了不同状态信号中干扰分量对特征提取的影响,提升了特征向量的状态识别能力。

在实际的工程应用中,外界复杂环境带来的干扰噪声增加了轴承故障特征提取的难度。为检测笔者提出方法在噪声干扰下的故障辨识能力,在测试样本中人为加入随机噪声干扰,从而测试样本更改为

$$x'(t) = [1 + \alpha \cdot \text{rand}(1)]'x(t), \quad (5)$$

式中: $x(t)$ 为原始测试数据; $\text{rand}(1)$ 为 $(-1, 1)$ 间的随机数; $\alpha$ 为干扰系数。对于干扰系数 $\alpha = 0.1, \alpha = 0.3$ 和 $\alpha = 0.5$ 时的测试样本进行分类辨识,其统计识别结果如表 2 所示(为降低随机性的影响, $\alpha = 0.1, \alpha = 0.3$ 和 $\alpha = 0.5$ 分别运行 10 次并以其平均值作为识别结果)。显然,相比于“特征提取-优化 KNNC”故障诊断模型,“PF 选取-特征提取-优化 KNNC”及“小波分解-特征提取-优化 KNNC”具有更强的识别能力,取得更高的故障诊断精度且基于 PF 选取的性能略优于小波分解;“PF 选取-特征提取-优化 KNNC”与“PF 选取-特征提取-KNNC”相比较,可看出优化的 KNNC 算法能明显提高正确识别率。

表 2 不同诊断模型抗干扰性能对比

Table 2 Comparison of different diagnosis model's interference-free performance

方法编号	诊断模型	识别精度/%		
		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.5$
A	PF 选取-特征提取-优化 KNNC	98	95	93
B	特征提取-优化 KNNC	98	91	89
C	小波分解-特征提取-优化 KNNC	96	93	91
D	PF 选取-特征提取-KNNC	97	91	89

图 4(a)与图(b)分别为方法“A”和“D”在  $\alpha=0.5$  时某单次运行中对测试样本的识别结果。两者相比可以看出基于改进的 KNNC 算法的正确识别率由 88% 提高到 93%，抗干扰性能明显提高。根据图 4(b)可以看出整体误判率仍有 7%，主要集中在 S2, S3 及 S4 的误判上，他们均属轴承外圈故障，而在内圈故障、外圈故障和滚动体故障的分类上误判率仅有 1%。图 4(a)中，整体误判率降低到 4%，优化后的 KNNC 算法在轴承故障是否同类的识别率也有明显提高。对比图 4(a)与 4(b)还可以看出，0.36 mm 外圈故障的识别率由传统的 60% 提高到改进后的 75%，优化的 KNNC 算法对外圈故障不同程度损伤的识别率有显著提高。因此，基于故障敏感分量选取特征值能有效地强化故障特征，优化的 KNNC 能减小干扰信号的影响，提高正确识别率，结果表明两者的有效结合在强噪声干扰下无论是对不同类型的故障还是对同类型故障不同程度的损伤均具有较高的识别能力。

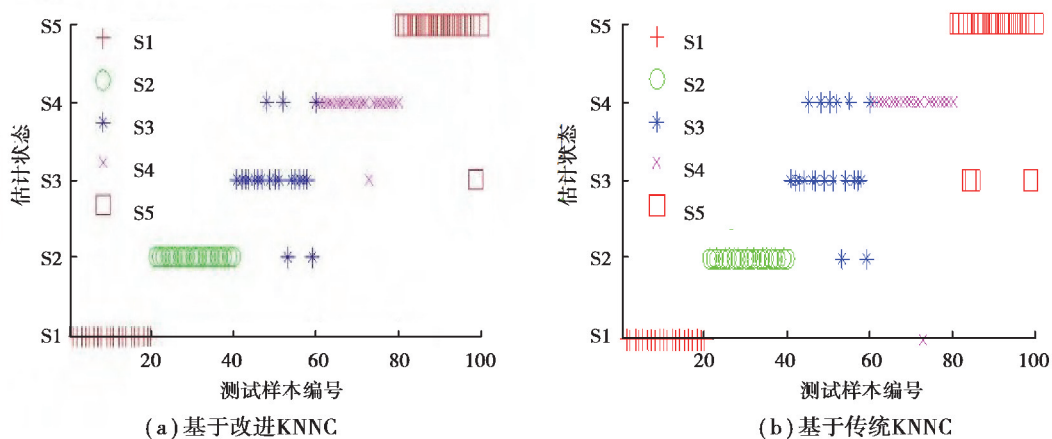


图 4 故障识别结果 Fig. 4 Results of fault identification

## 5 结 语

1) 笔者提出基于敏感 PF 分量选取的特征提取方法用于轴承故障诊断，该方法降低了轴承正常信号频率成分的干扰，强化了故障特征信息。

2) 提出了基于改进的二分 KNNC 方法，增强了其对不良样本的抗干扰性和降低了对  $K$  值的依赖性。

3) 将基于 PF 分量和改进的二分 KNNC 算法应用到轴承多类故障状态识别中，结果表明该方法能够有效辨识不同类型和同类型不同程度损伤的轴承故障，且具有较高诊断精度，该方法不仅能对轴承故障进行准确有效地识别，同样适用于机械或机器人系统的其他关键部件的故障检测。鉴于较好的识别精度及抗噪性能，该方法特别适用于野外运行的驱鸟、巡检机器人系统中的旋转类关键部件的故障检测。该方法的应用将有利于提高智能巡检机器人和驱鸟机器人的工作寿命和巡检性能其在机械设备或机器人系统故障检测和状态识别中具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Zeng M, Chen Z. SOSO boosting of the K-SVD denoising algorithm for enhancing fault-induced impulse responses of rolling element bearings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1282-1292.
  - [2] Yang B Y, Liu R N, Chen X F. Sparse time-frequency representation for incipient fault diagnosis of wind turbine drive train[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(11): 2616-2627.
  - [3] 徐星, 李垣志, 田坤云, 等. ACPSO-BP 神经网络在矿井突水水源判别中的应用[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(6): 91-101.
- XU Xing, LI Yuanzhi, TIAN Kunyun, et al. Application of ACPSO-BP neural network in discriminating mine water

- inrush source[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(6):91-101. (in Chinese)
- [ 4 ] 李嫒源, 袁梅, 王瑶, 等. SVM 与 PSO 相结合的电机轴承故障诊断[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(1):99-107.  
LI Yuanyuan, YUAN Mei, WANG Yao, et al. Fault diagnosis of motor bearings based on SVM and PSO[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(1): 99-107. (in Chinese)
- [ 5 ] 冯新扬, 张巧荣, 李庆勇. 基于改进型深度神经网络数据融合的滚动轴承故障识别[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(2): 52-62.  
FENG Xinyang, ZHANG Qiaorong, LI Qingyong. Fault recognition of rolling bearing based on improved deep networks with data fusion in unbalanced data sets[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(2): 52-62.(in Chinese)
- [ 6 ] Martín-Fernández J D, Luna-Romera J M, Pontes B, et al. Indexes to find the optimal number of clusters in a hierarchical clustering[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019: 3-13.
- [ 7 ] Rojas-Thomas J C, Santos M, Mora M. New internal index for clustering validation based on graphs[J]. Expert Systems With Applications, 2017, 86: 334-349.
- [ 8 ] Yunbin H E, Yupeng X, Jing W, et al. Improved K-means algorithm based on expectation of density and clustering validity index[J]. Computer Engineering & Applications, 2013, 49(24):105-111.
- [ 9 ] KouhiEsfahani R, Shahbazi F, Akbarzadeh M. Three-phase classification of an uninterrupted traffic flow: a k-means clustering study[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2019, 7(1): 546-558.
- [10] Li F, Wang J X, Chyu M K, et al. Weak fault diagnosis of rotating machinery based on feature reduction with Supervised Orthogonal Local Fisher Discriminant Analysis[J]. Neurocomputing, 2015, 168: 505-519.
- [11] Lu J Y, Zhu Q S, Wu Q W. A novel data clustering algorithm using heuristic rules based onk-nearest neighbors chain[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, 72: 213-227.
- [12] Bearing test data from Case Western Reserve University (CWRU) [EB/OL] (2001-01-05) [2019-07-17]. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>.

(编辑 张 苹)