

基于 LIBSVM 的融合傅里叶幅值与相位的示功图识别方法

孙婷婷, 韩 雪, 梁华庆

(中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘要: 通过示功图来诊断抽油机井工况, 是确保油井安全高效生产的一种重要手段; 针对现有示功图特征提取只利用其离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的幅度谱而忽略了其相位谱, 从而导致识别率较低的问题, 提出了一种融合 DFT 的幅度谱与相位谱的示功图识别方法; 首先, 将示功图数据组成复数序列, 取其 DFT 的幅度谱与相位谱构造特征向量; 其次, 对已知故障种类的示功图的特征向量进行训练, 构造多分类支持向量机(Support Vector Machines, SVM)分类判别模型; 最后, 通过 LIBSVM 分类识别方法对未知类别的示功图进行分类识别, 从而诊断抽油井的工况; 实测结果表明, 与只利用 DFT 幅度谱的方法相比, 该方法能够有效地提高示功图的识别率, 能为油井工况的准确分析、诊断与实时优化控制提供技术支撑。

关键词: 油井工况分析; DFT; 幅度和相位; 特征提取; LIBSVM

An Identification Method of Indicator Diagram Based on LIBSVM Fusion Fourier Amplitude and Phase Information

Sun Tingting, Han Xue, Liang Huaqing

(College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: It is an important means to ensure safe and efficient production of oil wells to diagnose pumping wells by means of indicator diagram. In view of the problem that the feature extraction of the present indicator diagram only uses the amplitude spectrum of its Discrete Fourier Transform (DFT) and ignores its phase spectrum, which leads to the low recognition rate, presents a method to identify the amplitude spectrum and phase spectrum of the fused DFT. Firstly, the DFT of the indicator diagram sequence is calculated and linearly independent and orthogonal eigenvectors are constructed according to its DFT amplitude spectrum and phase spectrum. Secondly, The characteristic vectors of the indicator diagram of the known fault-type are trained, and the multi-class support vector machines classification model is constructed. Finally, the LIBSVM identification method is used to classify the unknown type of indicator diagram to diagnose the working condition of the pumping well. The results show that this method can effectively improve the identification rate of the indicator diagram and provide technical support for accurate analysis, diagnosis and real-time optimization control of the oil well condition, compared with the method of using only the amplitude spectrum of DFT.

Keywords: well condition analysis; DFT; amplitude and phase information; feature extraction; LIBSVM

0 引言

石油在能源结构中占据至关重要的地位, 采油是石油生产过程中最基础和重要的环节。目前常用的采油方法中, 有杆泵采油法是应用最为广泛的^[1]。因此, 有效地监测抽油机井的工作状态, 快速准确地识别油井故障并采取合理有效的措施, 对提高采油效率, 增进油田效益有着举足轻重的作用。

油井实时示功图是油井工况的一个重要表征, 它能够直观地反映出抽油机在采油过程中发生的各种异常状况,

同时联系地质情况及井下技术状况等因素, 可以识别出井下泵发生的故障类型。根据示功图进行工况分析的主要方法有“五指式动力仪”分析法、地面示功图分析法和井下泵示功图诊断法。相比于其它方法, 地面示功图分析法具有更直观便捷, 简单易行的优点。因此, 根据油井示功图判断油井的工况是目前被广泛应用的方法^[2]。

在使用示功图进行工况诊断的过程中, 如何准确地对示功图进行特征提取, 直接关系到能否精确地对油井存在的故障做出判断, 因此, 必须要选取恰当的特征提取方法^[3]。目前, 用于油井工况分析的示功图特征提取的方法主要有基于几何不变矩的矩特征向量分析法、基于网格法的灰度矩阵统计量法和基于 DFT 的傅里叶描述子法^[4-6]。相比于其它方法, 傅里叶描述子法具有计算方法简洁高效、计算量小、冗余信息少的优势, 可以比较准确地提取出示功图的图像特征。

在传统的傅里叶描述子法中, 只提取了示功图数据经 DFT 得到的各次谐波的幅度谱, 并没有对各次谐波的相位谱

收稿日期: 2017-12-11; **修回日期:** 2018-01-08。

基金项目: 国家发改委(CNGI-12-03-043)。

作者简介: 孙婷婷(1994-), 女, 黑龙江省大庆人, 硕士研究生, 主要从事信号检测与处理方向的研究。

通讯作者: 梁华庆(1964-), 女, 广东省吴川人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事微弱信号检测与石油测控仪器方向的研究。

进行整合, 相当于只提取了图像波动的幅度情况, 并没有提取图像波动的位置信息, 从而丢失了示功图曲线形状的凸起或凹陷这类代表位置的有用信息, 对图像识别的准确性有较大的影响。本文提出了一种融合信号 DFT 的幅值与相位信息的特征提取方法, 更加完整地提取了示功图的特征信息, 并构造出能在极大程度上反映示功图图形特征的特征向量。此外, 相对于现在被广泛应用的二分类支持向量机, 本文采用一种基于多分类向量机的分类识别方法^[7-8], 并优选了核函数, 进一步提高了示功图诊断的准确率。

1 示功图特征分析及特征向量的构造

1.1 示功图特征理论分析

示功图是指在一个采油冲程过程中, 以抽油机相对下死点的位移 S 为横轴, 以抽油机的悬点载荷 P 为纵轴, 绘制出一条关于 $P-S$ 的曲线, 它是一个封闭曲线^[1]。

理论示功图是指只考虑悬点所承受的静载荷及由其引起抽油机杆柱及有关柱的弹性变形, 而不考虑其它因素影响时, 所得到的示功图曲线。典型示功图是在理论示功图的基础上, 只考虑某单一因素影响的载荷随位移的变化关系曲线。

图 1 为抽油机井常见工况的典型示功图图例^[9]。由图可见, 正常示功图近似于平行四边形 (理论示功图), 上下边出现轻微的震荡波浪线; 各类典型故障的示功图图形均存在一定的凸起或凹陷, 且凸起或凹陷的位置不同。

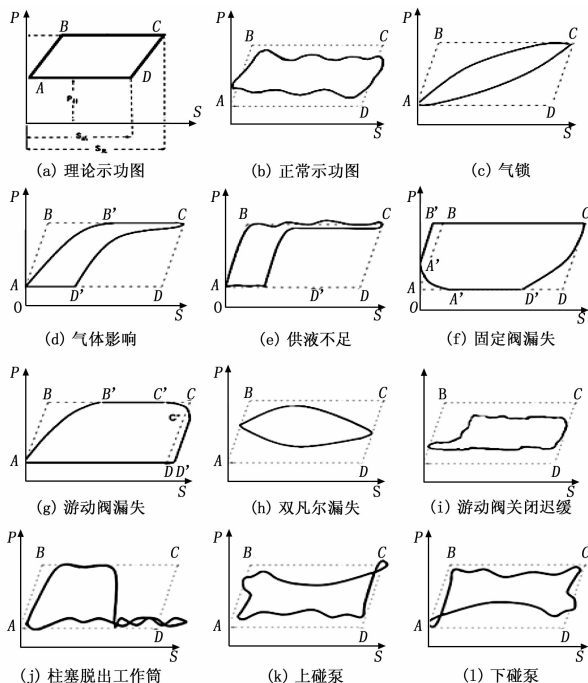


图 1 典型示功图图例

在油田现场, 由示功仪所采集的示功图一般是由下死点 (图 1 (a) 中 A 点) 开始, 经过一段时间达到加载终止点 (图 1 (a) 中 B 点), 该过程中得到的曲线称为增载线 (图 1 (a) 中 AB 段); 保持一定时间后又由上死点 (图 1

(a) 中 C 点) 开始, 经过一段时间达到卸载终止点 (图 1 (a) 中 D 点), 该过程中得到的曲线称为卸载线 (图 1 (a) 中 CD 段)。

结合各类故障示功图的形成因素, 对图 1 中各图进行分析可知, 各类典型故障的示功图图形的特征主要表现为:

- 1) 气锁: 增载线和卸载线均有一定弧度。
- 2) 气体影响: 增载线、卸载线均都比较平缓, 但增载线相对于卸载线更陡一些。
- 3) 供液不足: 增载线和卸载线相互平行, 且均比较陡直。
- 4) 固定阀漏失: 卸载线比增载线平缓, 示功图的左下角为圆弧。
- 5) 游动阀漏失: 增载线比卸载线平缓, 示功图的右上角为圆弧。
- 6) 双凡尔漏失: 增载线和卸载线都比较平缓, 形状呈水平椭圆形。
- 7) 游动阀关闭迟缓: 加载线延长且形状较陡直, 示功图的左上方有缺失。
- 8) 柱塞脱出工作筒: 增载线正常, 卸载线不太明显, 图形右下角有波浪曲线。
- 9) 上碰泵: 图形右上角有一个环状凸出。
- 10) 下碰泵: 图形左下角有一个环状凸出。

1.2 示功图特征 DFT 分析

在油田现场, 在一个冲程内, 由示功仪所采集的实测示功图数据通常为 200 或 250 个点的位移与载荷数据, 从而可以得到一组序列值 (s_n, p_n) , $n = 0, 1, \dots, N-1$, 其中 s_n 为位移, p_n 为载荷。将位移 s_n 和载荷 p_n 组合成如下一维复数序列:

$$z_n = s_n + jp_n$$

$$n = (0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

对于封闭的曲线, 该序列是以点数 N 为周期的周期序列。对其做 DFT, 得到:

$$Z_k = \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = |Z_k| e^{jh(k)}$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1; n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

Z_k 的模 $|Z_k|$ 称为 DFT 的幅值, 反映的是示功图序列波动的各次谐波的大小, 其相角 $h(k)$ 称为 DFT 的相位, 包含着其波动的位置信息。

图 2 为对各个典型示功图曲线作 250 点 DFT 得到的幅值谱 $|Z_k|$ 的曲线。由于幅度谱反映的是示功图波动的大小情况, 因此幅度谱分析结果与前文所述的各类典型故障的示功图图形均存在一定的凸起或凹陷相对应。

根据图 2 可知, 某些图形特征相似的故障类型的示功图, 如“气体影响”与“供液量不足”、“游动阀关闭迟缓”与“柱塞脱出工作筒”均存在较大的面积缺失现象; 再如“上碰泵”与“下碰泵”均存在环状凸出现象等, 它们两两之间的 DFT 幅度谱差异并不大, 因此, 难以对这些故障种类的示功图进行准确地区分。

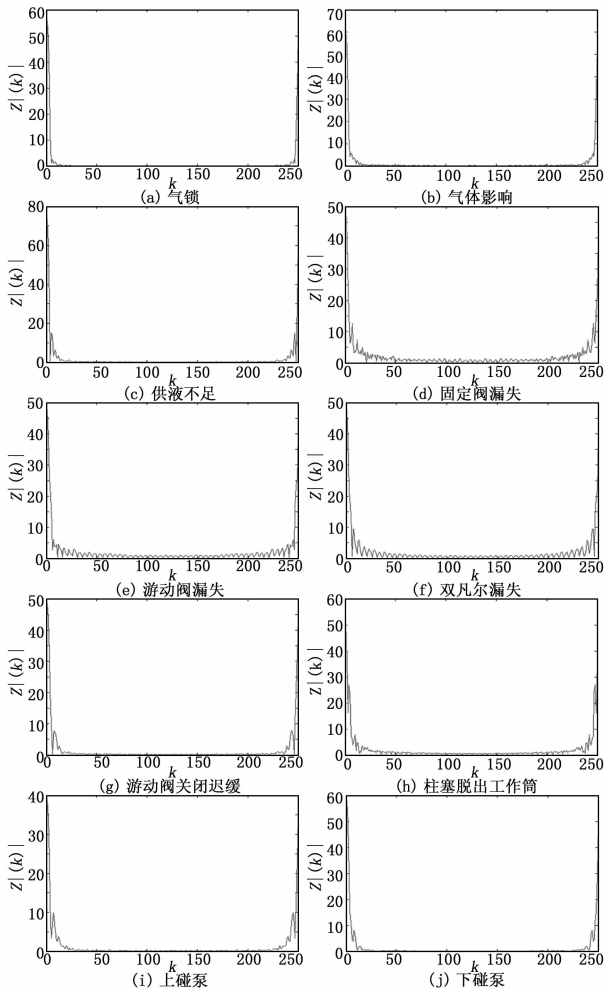


图 2 典型故障示功图的 DFT 幅值信息

图 3 为分别对各个典型示功图的上行数据（增载线）和下行数据（卸载线）作 250 点 DFT 得到的相位谱 $h(k)$ 的曲线。由于相位谱反映的是示功图波动的位置情况，因此相位谱分析结果与前文所述的各类典型故障的示功图图形的凸起或凹陷位置不同相对应。

根据图 3 可知，对于前文所述的 DFT 幅度谱差异不大的故障类型的示功图，如“气体影响”与“供液量不足”、“游动阀关闭迟缓”与“柱塞脱出工作筒”、“上碰泵”与“下碰泵”，它们两两之间的相位谱则有明显的差异，可以较好地分析出示功图特征的位置，从而较好地对这些故障种类的示功图进行准确地区分。

1.3 特征向量构造

为了克服传统傅里叶描述子方法在用于示功图识别的缺陷，本文将示功图序列的 DFT 幅度谱与相位谱进行融合，构造了能够充分反映出示功图图形的形状轮廓特征、细节波动与凹凸位置信息的特征向量。同时，根据 DFT 的定义可知，此特征向量的各个分量之间均线性无关并且相互正交，从而最大程度地获取了示功图在其特征空间的信息，因而有效地提高示功图类型识别的准确率。由欧拉变换可知，

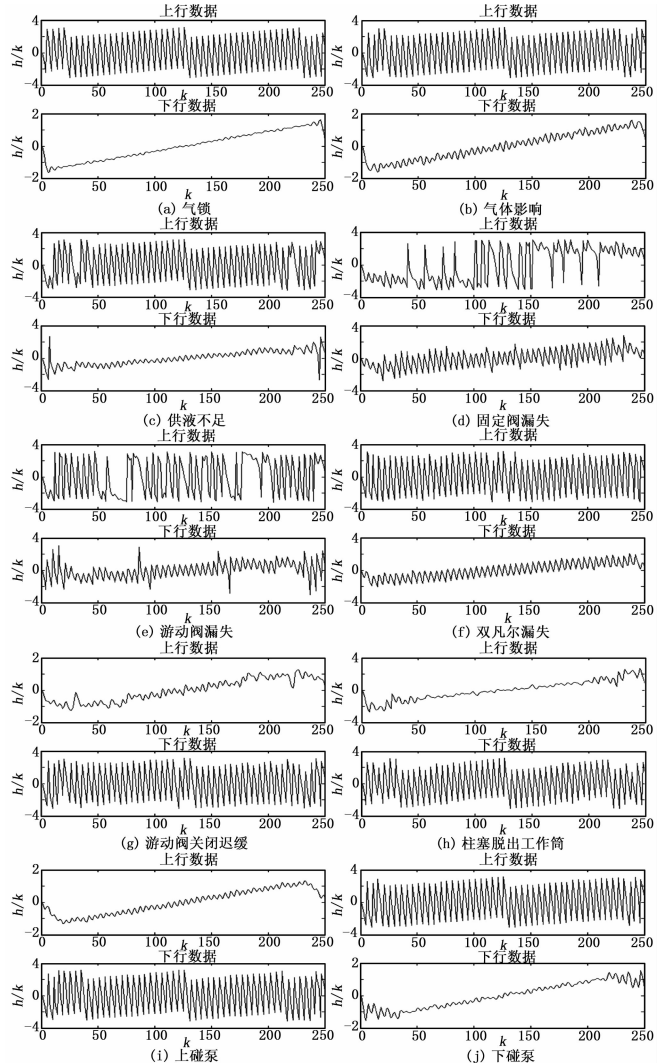


图 3 典型故障示功图的 DFT 相位信息

$$Z_k = |Z_k| e^{j h(k)} = |Z_k| \cos(h(k)) + j |Z_k| \sin(h(k)) \quad (3)$$

公式 (3) 中的实部和虚部均同时包含了 DFT 的幅度信息和相位信息，因此，为了简化计算，仅选取实部来构造特征向量。又由于信号的主要能量集中在其低次谐波分量上，因此，在兼顾精度及计算量的前提下，选取 DFT 的直流项及前 9 次谐波来构造特征向量，则最终构造的融合了幅度与相位信息的示功图特征向量如 (4) 式所示：

$$V = [A_0, A_1 \cos \varphi_1, \dots, A_9 \cos \varphi_9] \quad (4)$$

这样，对每一个示功图都可以构造出一个线性无关的特征向量，以此特征向量作为该示功图的特征，输入到由训练样本训练得到的分类判别器中，进行人工智能判别，从而对示功图进行正确的分类识别，得到油井的实际工况。

2 支持向量机算法

2.1 经典支持向量机算法

支持向量机 (SVM) 是 Corinna Cortes 和 Vapnik 等人于 20 世纪 90 年代提出的一种机器学习方法，它主要应用于

模式识别领域, 是一种结合了统计学理论的 VC 维理论以及结构风险最小化原则的模式识别方法, 在有限的训练样本中寻求学习能力与模型复杂度融合后的最佳折中结果, 从而得到最小误差分类器。

支持向量机的基本思想是: 首先, 判断样本数据是否线性可分: 1) 若样本为线性可分, 则直接寻找最优分类面进行分类; 2) 若样本为线性不可分, 则引入两个变量 (松弛系数和惩罚分量) 进行辅助分析, 通过非线性映射将样本映射到高维特征空间中, 在高维空间中寻找最优分类面对样本进行分类^[10]; 同时, 它通过使用结构风险最小化原理, 也在一定程度上对分类器实现全局的最优效果进行了保障。

SVM 只用于两类问题的分类, 解决多分类问题时通常是利用若干个两分类决策器解决多分类问题, 具体实现方法大致可分为以下几种:

1) 一对一分类方法 (one-versus-one): 该方法将多分类问题转化为若干个子分类问题, 任意两类构造一个两分类分类器, 对所有的两分类分类器都进行判断, 最终的结果为所占比重最大的类, 如图 4 所示。当子分类的数量过多时, 计算量很大, 会大幅度的降低训练与测试的速度。分类结果可能会出现分类重叠现象。

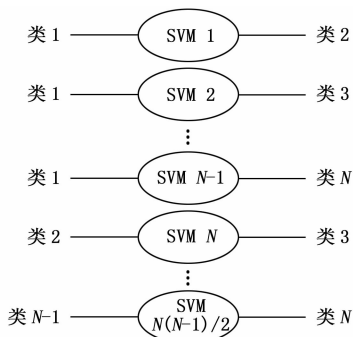


图 4 一对一分类方式示意图

2) 一对多分类方法 (one-versus-rest): 该方法将问题转化为多个两分类问题, 将某类看作两分类问题中的一类, 将其余的所有类看作另一类进行判别分类, 依次循环, 最终结果为分类函数值最大的类, 如图 5 所示。若训练样本数目过大, 会导致训练过程耗时很长。分类结果可能会出现分类重叠现象或不可分类现象。

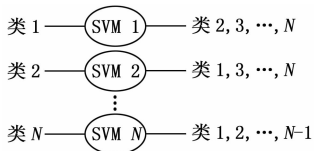


图 5 一对多分类方法示意图

3) 二叉树分类方法 (Binary Tree): 该方法是将样本数据分为两大类, 然后继续划分每个大类为两个类, 直至所有类不能再划分为止, 如图 6 所示 (图中示例 $n=4$)。在训练学习的过程中, 存在错误向下累积现象。

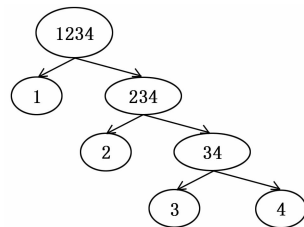


图 6 二叉树方法示意图

算法以有向无环图为理论基础, 将所有分类器构成有向无环图, 每次参与分类的两个类别可无重复的任意选取, 如图 7 所示 (图中示例 $n=4$)。在训练的过程中, 同样存在错误向下累积现象, 而且训练过程的时间通常较长。

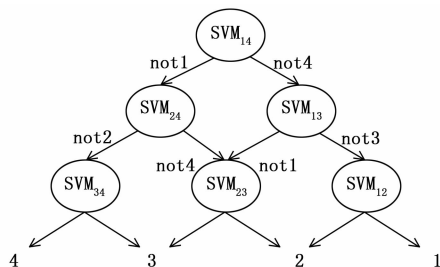


图 7 有向无环方法示意图

2.2 LIBSVM 算法

针对经典 SVM 的不足之处, 许多研究人员对 SVM 进行了更为深入地研究, 他们在将公式变形后研究出应用范围更具体且具有某些特定优势的变形算法。其中, 由台湾大学林智仁博士等^[11-12]于 2001 年开发设计的 LIBSVM 算法融合了收缩和缓存技术,

具有程序小, 运用灵活; 输入参数少, 操作简单; 是开源的, 方便改进、易于扩展等特点, 同时, 具有较好性能又适用于 Windows、Unix 等多种操作系统, 因此, 目前被许多国际著名研究机构所采用作为训练算法。

LIBSVM 作为通用的 SVM 软件包, 该软件对 SVM 所涉及的参数调节相对比较少, 提供了很多默认的参数设置, 利用这些默认参数可以有效地解决包括分类问题在内的多种类型的问题。同时, 它还有了交互检验的功能, 利用所提供的多种常用核函数可以将交叉验证的参数选择变得更为精准。该软件可以解决 C-SVM、 ν -SVM、 ϵ -SVR 和 ν -SVR 等问题, 包括基于一对一算法的多类模式识别问题。

所以, 本文选用了 LIBSVM 支持向量机分类器, 它能够支持向量机、分布估计与回归完整结合在一起, 从而对不同类型的示功图进行判别与诊断。LIBSVM 分类器的设计与应用步骤如图 8 所示。

3 应用实例

3.1 实验过程

本论文研究的是一种对油井实测示功图进行分类识别的方法, 该方法的实验过程分为图像预处理、训练和测试 3 个阶段。整体实验过程的流程如图 9 所示。

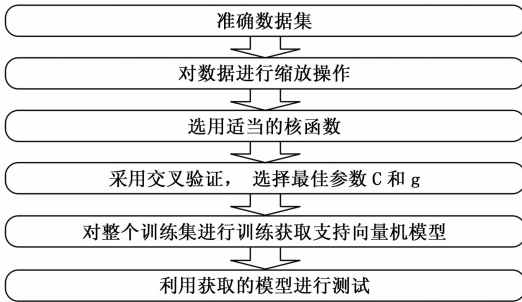


图 8 LIBSVM 分类器的设计与应用步骤

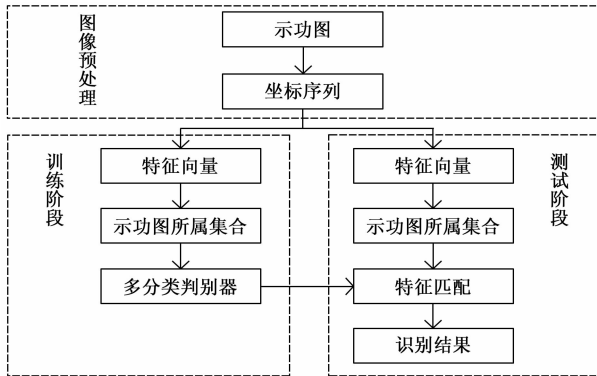


图 9 实验过程流程图

图像预处理阶段主要是消除图像中的无关信息，增强有用信息的可检测性，同时最大限度地简化数据，从而提高特征提取及匹配识别的准确性。主要包括归一化处理、形态学处理和坐标数字化处理。

训练阶段是根据已知故障类型的示功图的面积特征，将故障示功图粗略分为若干个集合，然后分别在各集合中对由训练样本构造的特征向量进行训练，最终得到多分类判别器。

测试阶段是根据待识别故障类型的示功图的面积特征来确定其所属集合，然后将由其构造的特征向量输入到相应的多分类判别器中，从而实现示功图的分类判别。

训练阶段和测试阶段在构造特征向量时均采用利用前文介绍的方法，在得到融合 DFT 幅度谱与相位谱各特征成分的特征向量后，均采用匹配高斯径向基核函数的支持向量机对示功图进行训练和测试。

3.2 实验参数选择

本实验在 Matlab 仿真平台上进行仿真验证。由于 LIBSVM 算法的准确率主要与训练和测试时所选取的核函数种类有关，而核函数的正确选取依赖于产生分类问题的实际问题的特点，不同的实际问题对相似程度有着不同的度量，因此，选择正确的核函数有助于提高分类准确率。

核函数的种类由参数 t 决定。 $t=0$ 时为线性核； $t=1$ 为多项式核； $t=2$ 时为高斯径向基函数； $t=3$ 时为 Sigmoid 核函数； $t=4$ 为自己定制的任意一种的核函数。表 1 为采用不同核函数时识别准确率的对比。对表 1 中数据进行对比分析可知：

- 1) 对于相同的数据，不同核函数的识别准确率不同；
- 2) 当样本数据量较少时，高斯径向基核函数识别准确率更高。

表 1 不同核函数时识别准确率对比 %

样本/ 测试个数	$t=0$ 时 准确率	$t=1$ 时 准确率	$t=2$ 时 准确率	$t=3$ 时 准确率
200/70	84.29	81.43	85.71	85.71
135/135	86.67	84.44	83.70	84.44
100/100	85.00	82.00	84.00	86.00
75/75	81.00	80.00	83.17	83.50
50/50	80.00	80.00	82.00	83.00
25/25	87.00	82.00	84.00	85.00
10/10	57.00	60.00	70.00	60.00

因此，考虑到实际采集到的示功图样本数量较少的情况，本实验在训练阶段和测试阶段支持向量机的核函数均选取高斯径向基核函数。

3.3 实验结果及分析

本实验选取了气锁、气体影响、供液不足、固定阀漏失、游动阀漏失、双尔凡漏失游动阀关闭迟缓、柱塞脱出工作筒、上碰泵和下碰泵，共 10 种油田实际生产中易出现的故障类型的共 275 组示功图数据进行分析研究。利用现场采集的实测示功图建立样本库，并根据面积特征划分为若干个集合，在各集合中根据每类典型故障示功图样本的数量情况，适当选取其中一部分作为训练样本，其余部分划归为测试样本。在构造特征向量时，分别采取仅使用幅值信息和融合幅值信息与相位信息两种方法，对相同的样本分别进行训练和测试，测试结果如表 2 所示。

表 2 不同特征向量构造方法的识别准确率对比

故障类型	方法一准确率/%	方法二准确率/%
气体影响	53.33	73.33
供液不足	86.67	93.33
固定阀漏失	73.33	86.67
游动阀漏失	73.33	86.67
双尔凡漏失	100.00	100.00
游动阀关闭迟缓	80.00	100.00
柱塞脱出工作筒	75.00	100.00
上碰泵	100.00	100.00
下碰泵	80.00	100.00
平均值	82.17	94.00

其中，方法一为仅利用 DFT 幅度谱构造特征向量；方法二为融合 DFT 幅度谱与相位谱构造特征向量。

结合前文对各类典型故障的示功图图形的理论分析和 DFT 分析结果，对表 2 中数据进行对比分析可知：

- 1) 本文提出的方法二的识别准确率的平均值较方法一的识别准确率的平均值有明显提高；
- 2) 方法一识别准确率较高的均为示功图图形特征明显且与其他故障类型的图形相似度较低的故障类型，如气锁、双尔凡漏失等，对于这些故障类型的示功图，本文提出的

方法二可将方法一的识别准确率继续保持;

3) 方法一识别准确率较低的故障类型多为图形特征不明显或与其他故障类型的图形相似度较高的故障类型, 如气体影响、供液不足、固定阀漏失、游动阀关闭迟缓、柱塞脱出工作筒、下碰泵等, 对于这些故障类型的示功图, 本文提出的方法二的识别准确率相较于方法一的识别准确率则有大幅提高。

4 结论

1) 提出了一种融合 DFT 幅值与相位信息的示功图特征提取方法, 相较于传统的傅里叶方法, 本文方法不仅可以反映示功图曲线的波动特征, 而且可以反映示功图曲线凹凸的位置特征, 能够更加全面和准确地表达出示功图所包含的特征信息。

2) 相对于现在被广泛应用的二分类支持向量机, 本文采用一种基于多分类向量机的分类识别方法, 并选取高斯径向基核函数, 进一步提高了示功图诊断的准确率。

3) 实测表明, 本文提出的示功图识别方法对油井示功图故障类型的诊断更加准确有效, 可为油井生产的实时分析与优化控制提供技术支撑。

参考文献:

[1] 欧阳传湘, 刘一江, 李 媚, 等. 一种识别抽油机井示功图的新方法 [J]. 江汉石油学院学报, 2000 (3): 16-20.

(上接第 225 页)

在 $0\sim 120^\circ$ 移相范围内改变触发角进行仿真, 记录每个触发角对应的直流电压平均值, 结合图 5 的仿真结果, 可得带电阻负载移相特性曲线有如下性质: 随着触发角的增大, 直流电压平均值会减小, 而且下降趋势陡度比较陡, 呈反比关系。

2.3 整流仿真分析及方案选择

针对特殊工艺的需要, 电源要求是 500 V 的高频方波。本次电源需要完成工频交流电整流为直流电。整流电路利用电力电子器件的单向导通特性将交流电变换为直流电。

由图 3 和图 5 的仿真结果可知: 单相桥式整流的峰值电压为 311 V, 没有达到 500 V 的要求, 而且直流脉动比较大; 三相桥式整流的峰值电压为 532 V, 达到 500 V 要求, 而且 6 脉波整流电路的波形比较平滑。

升压电路希望输入波形脉动较小平整规则, 变压升压器的匝数比不应太大, 这样更有利于进一步的斩波电路。综上所述, 本次方案设计采用三相桥式全控整流电路, 仿真结果表明达到预期的效果。

3 结束语

由于掩膜电解加工的复杂性和特殊性, 需要设计一款特种电源。本文分析了开关器件的特点, 重点讨论了频率特性和占空比的关系, 随着频率的上升及占空比下降, 波形失真度越变严重。分别对单相桥式和三相桥式进行 SimPowerSystems 建模仿真, 三相桥式整流的电压峰值达到设

[2] 刘益江, 张学臣, 李 伟, 等. 抽油井示功图综合解释 [J]. 油气地面工程, 2007, 26 (8): 3-5.

[3] 江志农, 张进杰, 敖静晖. 基于支持向量机的往复压缩机示功图识别研究 [J]. 流体机械, 2012, 40 (5): 21-25.

[4] 王晓露. 用于工况诊断的示功图特征提取方法研究 [D]. 中国石油大学, 2011.

[5] 李 刚, 王蒙军, 林 凌, 等. 视觉驱动的语音合成系统中唇形轮廓的正交变换描述 [J]. 光学精密工程, 2007, 15 (7): 1117-1123.

[6] 仇治学. 基于示功图分析的有杆泵抽油井故障诊断方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

[7] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: A library for support vector machines [M]. ACM, 2011.

[8] 孙瑶琴. 改进粒子群算法优化支持向量机在故障诊断中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (03): 48-50, 54.

[9] 米立飞. 基于仿生模式识别的有杆抽油泵示功图识别方法研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2013.

[10] 陈家伟. 支持向量机在人体健康状态预测中的研究与应用 [D]. 中国科学技术大学, 2014.

[11] Joseph S M, Hameed A. Online handwritten Malayalam character recognition using LIBSVM in Matlab [A]. Communication, Signal Processing and Networking. IEEE [C]. 2015: 1-5.

[12] 任立辉, 李文东, 慈兴华, 等. 基于 LIBSVM 的石油录井中岩屑岩性识别方法研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版) 自然科学版, 2010, 40 (9): 131-136.

计要求, 纹波较小, 波形平顺。仿真结果表明, 各节点的实验波形符合预期。

下一阶段的工作将构建滤波和斩波电路模型, 进行参数计算, 利用 SimPowerSystems 建模, 得到可调占空比的方波, 实现频率连续可调。

参考文献:

[1] 姚 震, 郭钟宁, 张永俊. 旋转超声加工中的频率跟踪技术研究 [J] 机床与液压, 2013 (11): 5-7.

[2] 吴 明, 郭钟宁, 孙涛涛. 侧壁绝缘电极脉冲电解加工的实验研究 [J] 现代制造工程, 2015 (11): 11-14.

[3] 王雅丽, 李 青, 王树锦. 脉冲高压电源的控制与分析 [J] 高压技术, 2006, 04: 65-67.

[4] 杜荣权, 陈乐柱, 穆 瑜. 基于 DSP 控制的可调高频脉冲电源研究 [J] 电力电子技术, 2014 (12): 32-34.

[5] 李远波, 刘国跃. 电化学与磨削复合加工技术研究现状 [J] 组合机床与自动化加工技术, 2011 (2): 5-9.

[6] 徐 健, 叶汉民, 蒋存波. 电火花加工中数控脉冲电源的设计 [J] 制造技术与机床, 2006 (10): 39-41.

[7] 李远波, 黄石生. 软开关逆变式双丝高速脉冲焊电源 [J] 电焊机, 2010 (1): 35-39.

[8] 丁明军, 李玺钦, 黄 雷. 100 kV 重复频率高压脉冲电源 [J] 强激光与粒子束, 2012 (4): 929-932.

[9] 刘彬彬, 何金龙. 用于微流控制备的 3D 打印机设计 [J] 计算机测控与控制, 2018, 26 (3): 82-85.

[10] 黄晓林. 脉宽调制器 SG3525 及其在变频电源中的应用研究 [J] 电气传动, 2005, 10: 31-34.