

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.039

基于振动信号极值点发生时刻的真空断路器状态评估

王 飞¹, 高文胜², 赵宇明³, 张 欣³, 姚森敬³

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000)

摘要: 高压断路器的运行状态关系到电力系统的安全与稳定,为此文中提出了一种基于振动信号极值点发生时刻和支持向量机的断路器状态评估方法,即以断路器分合闸线圈带电时刻为时间零点,以振动信号极大值点发生时刻为特征量,利用经粒子群优化的支持向量机建立断路器状态评估模型。试验模拟了某真空断路器的 5 种故障,并利用上述方法进行了分析,结果表明,该方法可以准确有效地评估断路器运行状态。

关键词: 真空断路器; 振动信号; 状态评估; 支持向量机

State Evaluation of Vacuum Circuit Breaker Based on the Occurrence Time of Extreme Point of Vibration Signal

WANG Fei¹, GAO Wensheng², ZHAO Yuming³, ZHANG Xin³, YAO Senjing³

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: A new method for evaluating the state of a circuit breaker based on the occurrence time of extreme point of vibration signal and the support vector machine(SVM) algorithm is proposed. The method takes the charged moment of tripping/closing coil as the zero time, and takes the occurrence time of extreme point of vibration signal as the characteristic parameter to establish a state evaluation model of circuit breaker by making use of the support vector machine optimized by particle swarm optimization. Five failures of circuit breakers are simulated, and the results show that the proposed method is suitable for state evaluation of vacuum circuit breaker.

Key words: vacuum circuit breaker; vibration signal; state evaluation; support vector machine(SVM)

0 引言

断路器是高压开关设备中最重要的电气设备,其可靠性关系到电力系统的安全稳定运行,根据国际大电网会议(CIGRE)对高压断路器故障调查统计,机械故障占断路器总故障的 60%以上,且机械故障中绝大多数是操动机构的问题^[1-2],因此对断路器运行状态尤其是机械状态进行监测和评估十分重要。研究表明,断路器操动机构动作时的振动特征信号

包含了大量的设备状态信息^[3-4]。同时,振动信号测量具有硬件简单、费用低、受干扰小、不改变断路器内部结构的特点,因此振动信号分析是断路器状态评估的重要方法。

文[5-6]利用小波包分解与重构原理,将处理后的振动信号分解到不同的频带,并提取每频带的能量作为特征量,以此来实现断路器的机械故障诊断;文[7-8]在振动信号小波包分解的频带能量的基础上,以各频带能量特征熵作为断路器机械状态诊断的特征量,建立断路器故障识别模型;文[9-10]通过

收稿日期:2016-11-07; 修回日期:2016-12-28

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(20142001342)。

Project Supported by Technique Project of China Southern Power Grid Co.,Ltd.(20142001342).

提取断路器振动信号的特征参量, 利用支持向量机算法实现断路器的故障诊断。上述方法中的小波包频带能量与频带能量特征熵虽然能够实现断路器的故障诊断, 但方法计算量大、输入向量多, 且振动信号在采集过程中容易受噪声干扰, 导致分解的频带能量可能与真实值存在差异, 造成故障诊断发生误差。

文中以某公司 VD4 型真空断路器为研究对象, 提取振动信号极大值发生时刻为特征量, 建立基于支持向量机的断路器状态评估模型, 并通过断路器故障模拟试验验证该方法的可行性。

1 振动信号特征量的提取

1.1 振动信号小波包降噪

断路器动作过程中, 由于触头、电磁铁、主轴、连杆机构、脱扣机构等部件的相互作用, 导致振动信号具有很强的瞬时非平稳性^[4], 小波包分析是一种典型的非平稳信号分析方法, 能够对信号进行多层频带划分, 选择最优基与信号频谱相匹配, 从而提高信号的时频分析能力^[12-13]。振动信号在采集过程中, 不可避免地会受到高频噪声干扰, 利用小波包分析方法能够很好地对振动信号进行降噪处理, 具体步骤如下:

- 1) 选择合适的小波包分解层数 N , 对振动信号进行 N 层分解;
- 2) 选取最优小波包基;
- 3) 小波包分解系数的阈值量化;
- 4) 信号的小波包重构。

因此, 振动信号小波包降噪过程见图 1。

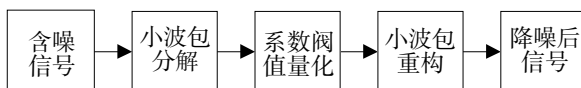


图 1 小波包降噪流程图

Fig. 1 Flowchart of wavelet packet noise reduction

1.2 特征量的提取

断路器的分合闸线圈反映了电磁铁本身以及所控制的锁门等在操作过程中的动作情况^[14-15]。断路器分合闸线圈带电时刻在实际分析中易于编程计算且结果可靠, 因此将线圈带电时刻 t_0 作为振动信号的时间零点, 见图 2。

断路器在分合闸过程中, 由于其各个机构之间的相互摩擦和碰撞, 导致振动信号在时间轴上包含多次强度不同的振荡, 每次振荡可能代表着一次机构间的相互作用, 因此可按照一定的振动幅值和时间间隔要求, 提取振动信号某几次振荡的极大值点发生时刻作为断路器状态评估的特征量, 振动信号以线圈带电时刻为时间零点, 见图 3。

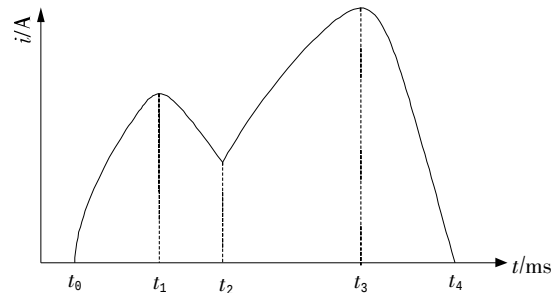


图 2 分合闸线圈带电时刻 t_0 示意图

Fig. 2 The current waveform of coil and start time t_0

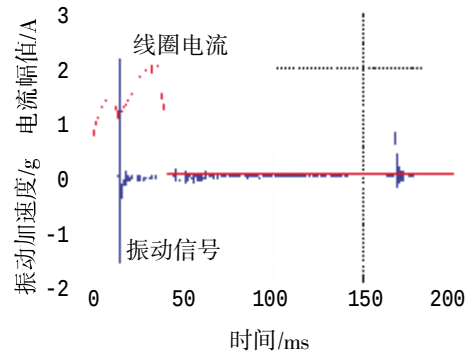


图 3 振动信号与线圈电流

Fig. 3 Vibration signal and coil current

2 支持向量机算法

支持向量机(support vector machine, SVM)是一种建立在结构风险最小化原理和统计学习理论基础上的小样本机器学习方法^[16-17], 这与实际研究中断路器振动信号样本少的特点具有很强的适应性, 与神经网络相比, SVM 具有结构简单、泛化能力高的特点, 且推广能力明显优于一些传统的学习方法, 更适用于状态评估这种实际工程问题^[18-19]。近年来, SVM 在模式识别、信号处理、基因图谱识别以及回归分析等问题中得到了成功的应用。

SVM 本质上是一种非线性数据处理方法, 它的基本思想是寻找一个能够满足数据分类要求的最优分类超平面, 并把寻找最优线性超平面的算法归结为求解一个凸规划问题, 进而基于核函数展开定理, 通过非线性映射把样本空间映射到一个高维的特征向量空间, 并在该特征空间中构造最优分类超平面, 解决样本空间中的非线性分类问题。

以两类数据分类为例, 设训练样本集为 (x_i, y_i) , 其中, $i=1, 2, \dots, l$; $x_i \in R^n$, $y_i \in \{\pm 1\}$, 若超平面为 $xw+b=0$ 能够将数据无错误的分开且离超平面最近的数据向量离超平面的距离是最大的, 那么这个超平面称为最优超平面, 同样, SVM 先通过某种非线性映射, 将输入数据向量映射到一个高维空间, 并构建其最优超平面, 实现数据分类^[20]。

应用 SVM 方法解决数据分类问题的基本步骤

如下:

- 1)选择惩罚系数、选择核函数及其相关参数;
- 2)解凸优化问题,求其最优解系数;
- 3)利用支持向量,求最优权值向量和最优偏置;
- 4)根据判决函数进行数据分类。

3 实际应用分析

3.1 故障模拟与数据采集

以 VD4/Z12.12.25 型真空断路器为研究对象,其额定电流为 1 250 A,额定电压为 12 kV;采用的振动传感器为 YD-38 型压电式加速度计,其具有 $\pm 1\ 000\text{ g}$ 的幅值测量范围,1 Hz~12 kHz 的频率测量范围。加速度传感器安装位置见图 4。试验中振动加速度传感器安装在断路器分合闸电磁铁、外壳上方、油缓冲器、辅助开关处等位置,同时利用电流传感器采集线圈电流信号。

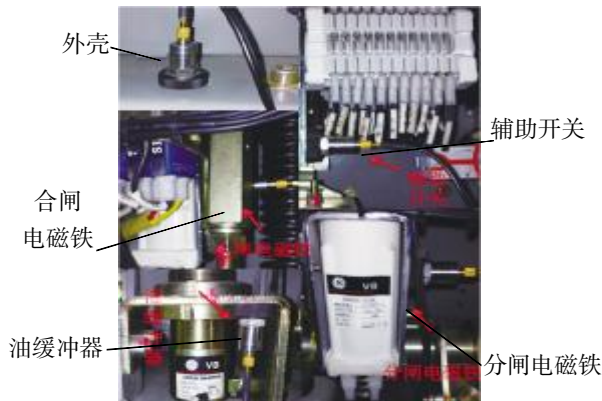


图4 加速度传感器安装位置

Fig. 4 Acceleration sensor installation location

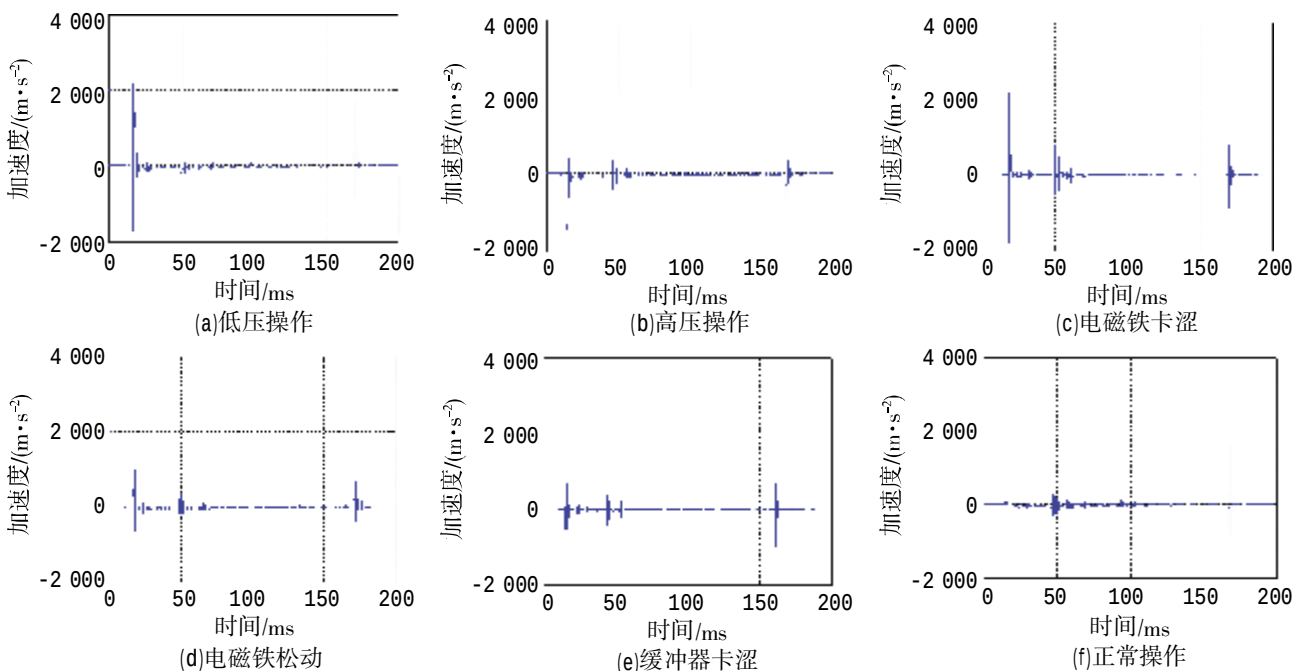


图5 断路器各状态下的振动信号

Fig. 5 Vibration signal of circuit breaker under different conditions

数据采集时,首先采集了断路器正常空载状态下的 30 组分合闸数据;然后模拟了 5 种断路器故障,每种故障状态下各采集了 30 组分合闸数据。模拟故障包括:

1)操作电压过低。在断路器无载情况下,通过调节断路器分合闸电磁铁控制电压来模拟电压波动故障,其中模拟低操作电压故障时电磁铁控制电压均为 85%额定电压;

2)操作电压过高。模拟高操作电压时分合闸电压分别为 120%和 110%额定电压;

3)电磁铁卡涩故障。通过电磁铁动铁心下端螺栓增加重物的方法,模拟电磁铁卡涩故障;

4)电磁铁铁心松动故障。通过松动电磁铁铁心固定螺栓的方法,增加电磁铁的行程,模拟电磁铁铁心松动故障;

5)缓冲器卡涩故障。通过在缓冲器缓冲连杆上加入橡皮限位减少缓冲距离的方法,模拟缓冲器卡涩故障。

文中以断路器合闸过程中合闸电磁铁位置处振动信号为例,各状态下经小波包降噪后的振动信号见图 5。

由图 5 可以看出,断路器在这 6 种状态下的振动信号之间并没有明显的差异和变化规律,需要对信号进行进一步的分析,提取合理的特征量。

3.2 状态评估

断路器在动作过程中,各个部件之间的碰撞事件均以振动波的形式表现在振动信号上,因此可以

通过提取这些事件的时域特点, 实现对振动信号的分析。

文中计算了断路器操动机构动作时的 3 次强烈碰撞事件所对应的振动信号极大值发生时刻, 见图 6。根据断路器合闸操作时机机构内部的动作情况, 可判断这 3 个振动事件依次为: 电磁铁动铁心碰撞静铁心、合闸动静触头碰撞、分闸保持楔子动作。

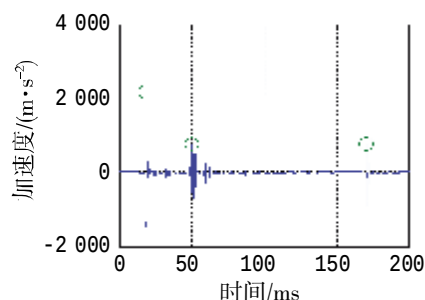


图 6 振动信号极值点时刻示意图

Fig. 6 The occurrence time of vibration signal extreme point

将断路器在正常状况下和模拟的 5 种故障下采集到的 180(6×30)组合闸振动信号进行降噪处理, 并提取其 3 个极大值的发生时刻为特征量, 部分特征量数据见表 1。

表 1 部分振动信号特征量数据

Table 1 Partial vibration signal characteristic data

特征量编号	时刻 1/ms	时刻 2/ms	时刻 3/ms	断路器状态
1	17.86	50.71	170.23	低压操作
...	17.18	50.56	170.52	
30	17.23	50.66	170.96	
31	14.33	47.69	168.81	高压操作
...	14.46	47.06	168.41	
60	14.43	47.16	168.72	
61	18.16	51.51	162.18	电磁铁卡涩
...	18.51	51.65	163.80	
90	18.26	51.45	165.55	
91	16.51	50.50	172.61	电磁铁松动
...	16.42	50.97	172.65	
120	16.03	50.40	172.86	
121	15.08	46.27	165.50	缓冲器卡涩
...	15.25	46.48	165.11	
150	15.03	46.74	165.54	
151	15.01	48.20	168.37	正常操作
...	15.58	48.77	168.86	
180	15.58	48.27	168.84	

将提取的振动信号特征量进行归一化后, 随机分为 2 类, 即断路器每种状态下的 SVM 训练数据 20 组, 测试数据 10 组, 然后输入 SVM 中进行状态评估, 状态评估流程见图 7。

在随机选定训练数据与测试数据后, 使用粒子

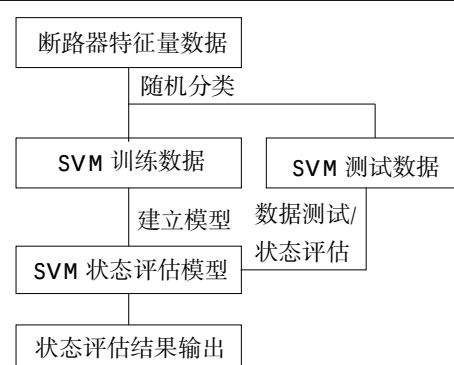


图 7 状态评估流程图

Fig. 7 Flow chart of the condition evaluation

群优化算法选择最优惩罚参数 c 和核函数参数 g , 实现对支持向量机分类性能的优化, 并最终得到的最优参数 $c=2.27, g=0.68$ 。在选定惩罚参数和核函数参数的情况下, 利用训练数据训练支持向量机, 并利用该支持向量机对测试数据进行分类, 分类结果见图 8。

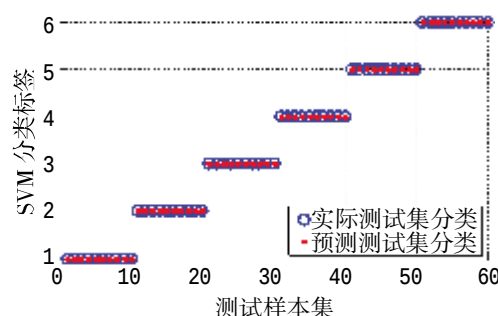


图 8 实际分类与预测分类对比图

Fig. 8 Comparison chart of actual classification and prediction classification

由图 8 可以看出, 60(6×10)组测试数据不仅能够相互区分(即图中分类标签不同), 而且测试分类与实际分类完全相同, 表明构建的 SVM 分类模型能够准确的分别出各个状态下的数据, 并将其正确分类。

综上所述, 以信号极大值发生时刻作为振动信号的特征量可以有效的表征断路器在不同状态下的运行特点, 以该特征量作为断路器状态特征量并建立基于 SVM 的断路器状态评估模型, 能够准确的将断路器各个状态区分开来, 并实现故障各状态的正确分类, 从而达到断路器状态评估的目的。

4 结语

文中提出了一种基于振动信号极大值发生时刻和支持向量机的断路器状态评估方法, 即以振动信号为分析对象, 提取断路器操动机构动作时的某几次强烈碰撞事件所对应的振动信号极大值发生时刻作为特征量, 建立了基于支持向量机的断路器状态评估模型, 并通过断路器正常状态和模拟断路器高

压操作、低压操作、电磁铁卡涩、电磁铁松动、缓冲器卡涩5种故障状态试验,结果表明,该方法能够准确评估断路器的状态,且具有特征量计算方便、输入向量少、评估结果准的特点。

参考文献:

- [1] 赵洋,刘汉宇,曾庆军.基于机械振动信号的高压真空断路器故障诊断研究[J]. 高压电器,2010,46(2):46-51.
ZHAO Yang,LIU Hanyu,ZENG Qingjun. Study on fault diagnosis of high voltage vacuum circuit breaker based on mechanical vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010,46(2): 46-51.
- [2] LAI M L,PARK S Y,LIN C C,et al. Mechanical failure detection of circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1988,3(4): 1724-1731.
- [3] RUNDE M,OTTESEN G E,SKYBERG B,et al. Vibration analysis for diagnostic testing of circuit-breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(4): 1816-1823.
- [4] 徐建源,张彬,林莘,等.能谱熵向量法及粒子群优化的RBF神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高电压技术,2012,38(6):1299-1306.
XU Jianyuan,ZHANG Bin,LIN Xin,et al. Application of energy spectrum entropy vector method and RBF neural networks optimized by the particle swarm in high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering,2012,38(6): 1299-1306.
- [5] 孟永鹏,贾申利,荣命哲.小波包频带能量分解在断路器机械状态监测中的应用[J]. 西安交通大学学报,2004,38(10):1013-1017.
MENG Yongpeng,JIA Shenli,RONG Mingzhe.Application of frequency band energy decomposition using wavelet packet in condition monitoring of circuit breakers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2004,38(10):1013-1017.
- [6] 陈伟根,范海炉,王有元,等.基于小波能量与神经网络的断路器振动信号识别方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):29-32.
CHEN Weigen,FAN Hailu,WANG Youyuan,et al.Circuit breaker vibration signal recognition based on wavelet energy and neural network[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(2):29-32.
- [7] 孙来军,胡晓光,纪延超,等.小波包—特征熵在高压断路器故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):62-65.
SUN Laijun,HU Xiaoguang,JI Yanchao,et al.Fault diagnosis for hv circuit breakers with characteristic entropy of wavelet packet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(14):62-65.
- [8] 钟建英,刘洋,林莘,等.基于振动信号特征的高压断路器机械故障诊断技术研究[J]. 高压电器,2013,49(9):49-54.
ZHONG Jianying,LIU Yang,LIN Xin,et al.Mechanical fault diagnosis technology research of high-voltage circuit breakerbased on the vibration signal characteristic[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(9):49-54.
- [9] 程序,关永刚,张文鹏,等.基于因子分析和支持向量机算法的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 电工技术学报,2014,29(7):209-215.
CHENG Xu,GUAN Yonggang,ZHANG Wenpeng,et al. Diagnosis method on the mechanical failure of high voltage circuit breakers based on factor analysis and SVM[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2014,29(7):209-215.
- [10] 黄建,胡晓光,巩玉楠.基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(12):108-113.
HUANG Jian,HU Xiaoguang,GONG Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(12): 108-113.
- [11] 常广.高压断路器振动监测与故障诊断的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
CHANG Guang. Vibration monitoring and fault diagnosis of High voltage circuit breakers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2012.
- [12] LEE D S,LITHGOW B J,MORRISON R E. New fault diagnosis of circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(2): 454-459.
- [13] HU Xiaoguang,WANG Jianze,JI Yanchao,et al.The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Canada:IEEE, 2003:1-5.
- [14] 袁金丽,李奎,郭志涛,等.基于SVM与合分闸线圈电流参数的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2011,47(3):26-30.
YUAN Jinli,LI Kui,GUO Zhitao,et al. Mechanical failure diagnosis of high voltage circuit breaker based on SVM and opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(3): 26-30.
- [15] 张永奎,赵智忠,冯旭,等.基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2013,49(2):37-42.
ZHANG Yongkui,ZHAO Zhizhong,FENG Xu,et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(2): 37-42.
- [16] 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):1-10.

- DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 1-10.
- [17] 王国胜. 支持向量机的理论与算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- WANG Guosheng. Research on theory and algorithm for support vector machine classifier[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.
- [18] TONG S, KOLLER D. Support vector machine active learning with applications to text classification[J]. Journal of Machine Learning Research, 2002, 2(1): 45-46.
- [19] LIN G M, BAE D M, KIM J H. Fault diagnosis of rotating machine by thermography method on support vector machine[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(8): 2947-2952.
- [20] 郭创新, 朱承治, 张 琳, 等. 应用多分类多核学习支持向量机的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 128-134.
- GUO Chuangxin, ZHU Chengzhi, ZHANG Lin, et al. A fault diagnosis method for power transformer based on-multiclass multiple-kernel learning support vector machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 128-134.
- 王 飞(1991—), 男, 硕士, 研究方向为电力设备状态检测与故障诊断技术。