

# 基于改进二叉树多分类 SVM的焊缝缺陷分类方法

罗爱民<sup>1,2</sup>, 沈才洪<sup>2</sup>, 易彬<sup>2</sup>, 李坤<sup>3</sup>

(1. 四川大学 轻纺与食品学院, 成都 610064 2. 泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646000  
3. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘 要:** 为了进一步提高焊缝缺陷识别精度, 定义了一种类分离度, 提出了改进二叉树多分类 SVM的焊缝缺陷分类方法。在焊缝缺陷分类时, 计算每个类的类分离度, 将类分离度最小的两个类进行训练得到 SVM子分类器 SVM<sub>1</sub> 并将这两个类合并成一个新簇 G 同理对新簇 G 和剩下的 k-2 类进行类分离度的评估, 将类分离度最小的两类训练得到 SVM子分类器 SVM<sub>2</sub> 并合并成新簇 H 直至得到 k-1 个 SVM分类器, 训练结束得到良好的二叉树的分类结构。利用聚类生成好的优化二叉树 SVM进行判别焊接缺陷。结果表明, 新算法具有高的分类精度和推广能力。

**关键词:** 支持向量机; 类分离度; 二叉树; 焊缝缺陷识别

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2010)07-0051-04



罗爱民

## 0 序 言

焊接缺陷会给设备的安全运行带来危险, 每种缺陷都有各自的产生原因、主要形态和特征。准确识别焊缝缺陷类别, 对于改进焊接工艺、提高焊接质量和电站安全保障具有重要意义<sup>[1]</sup>。

国内研究者对焊缝缺陷的自动评判进行了一些深入研究<sup>[2-4]</sup>, 文献[5]根据边缘的几何不变矩, 利用 BP神经网络技术实现了焊缝缺陷的分类, 文献[6-7]也研究了焊缝底片的计算机辅助识别技术, 但目前都存在缺陷定位不准, 对裂纹、未熔合等缺陷的分类和识别仍存在精度不高等问题。

支持向量机在分类上近年来应用很多<sup>[8-9]</sup>。对于传统的二叉树 SVM算法, 不同的二叉树层次结构会得到不同的分类模型, 对分类精度和泛化能力有一定影响。若是在某个结点上发生分类错误, 就会产生误差累积现象, 尤其对于一个偏二叉树结构, 其误差累积现象会更严重。

因此考虑应用改进二叉树多分类 SVM算法来对焊缝缺陷进行分类, 该方法生成一种优化的二叉树结构, 当其形态接近于正态树(平衡树)时, 将具有更快的训练速度和更少量的分类器, 大大提高了分类精度。

## 1 SVM理论基础

SVM其原理为通过采取结构风险最小化原则, 将输入向量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超平面:  $w \cdot x + b = 0$  且满足

$$\begin{cases} (w \cdot x_i) + b \geq 1 & y_i = 1 \\ (w \cdot x_i) + b \leq -1 & y_i = -1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $w$  为分类超平面法线;  $b$  为分类阈值;  $x_i$  属于两类中的一类。

对于多分类情况, 则选择合适的核函数  $K(x, x_i)$  及核参数

$$Q(a) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j K(x_i, x_j) \\ 0 \leq a_i \leq C, \sum_{i=1}^n a_i y_i = 0 \quad (2)$$

式中:  $a$  为拉格朗日乘子。

求解拉格朗日系数, 得出最优决策超平面, 即

$$f(x) = \text{sgn} \left[ \sum_{i=1}^{nk} a_i^* y_i K(x_i, x) + b^* \right] \quad (3)$$

目前, 支持向量机普遍采用的内积核函数有三类<sup>[10]</sup>: (1)多项式核函数; (2)径向基核函数; (3)多层感知器核函数。

焊缝缺陷分类是多分类问题, 常用多类 SVM的构造方法有: 一类对余类法<sup>[11]</sup>、一类对一类法<sup>[12]</sup>、决策二叉树法<sup>[13]</sup>。目前两分类问题已有较好的解

决方法,而多分类问题仍缺乏有效的解决方法.

2 基于自适应二叉树多分类 SVM算法

多类分类问题可以通过两类分类问题进行转换.如果一个多类问题已知其任意两类可分,则可以通过一定的组合方法最终实现  $N(N \geq 2)$  类可分.因此可以把基于两类分类的 SVM和二叉树思想结合起来构造多类别分类器,这种多类别分类方法称为二叉树多分类 SVM方法.

2.1 基于二叉树 SVM现存在的问题和不足

目前关于二叉树 SVM的研究很多,但存在一些问题. (1) 二叉树结构对多分类的分类精度有较大影响. 对于同一个多分类采用不同的二叉树结构,得到不同的分类模型,其最后的性能也会不同. (2) 很多二叉树 SVM是基于先验知识构建的,其分类器性能很大程度依赖于树的结构,在建树的过程中,若是分类错误越靠近根结点,则经过层层分支后,累积误差就越大,大大降低对样本缺陷的分类识别能力,同时基于先验知识的二叉树结构也限制了其推广性能.

2.2 基于最小类分离度聚类的二叉树 SVM算法

2.2.1 类分离度的定义

目前测量样本向量间类与类距离时采用欧氏距离.但对于在映射空间有类交叉情况,如图 1 所示,当用欧氏距离进行计算时,得到图 1 a图类间的欧氏距离与图 1 b图类间的欧氏距离一样,无法通过欧氏距离来判别图 1 a与图 1 b中各类的分离难易程度.明显图 1 b比图 1 a中的类更容易分离出来.因此在评估样本各类间易分性时,采用欧式距离不能科学地评定出类间易分性.所以定义了一种新的类与类间距离  $d_i$  即

$$d_i = \frac{\| \varphi - \psi \|}{\frac{1}{n} \sum_{x \in X_i} \| x - \varphi \| + \frac{1}{n} \sum_{x \in X_j} \| x - \psi \|}$$

(,  $i = 1, 2, \dots, k$  且  $i \neq j$ ) (4)

式中:  $\| \varphi - \psi \|^2$  表示类  $i$  与类  $j$  间中心距离;  $\varphi = \frac{1}{n} \sum_{x \in X_i} x$  表示样本的类中心,  $i = 1, 2, \dots, k$   $n_i$  为类  $X_i$  中的测试样本个数;  $\frac{1}{n} \sum_{x \in X_i} \| x - \varphi \|^2$  表示第  $i$  类样本中,测试样本偏离类中心的平均距离,反应类的特征空间分布情况.

综合考虑  $k$  类样本中,每一类的易分离程度都受其余各类影响,故文中第  $i$  类的类分离度设计为第  $i$  类与其它  $k - 1$  类的距离值  $d_i^1$  ( $n = 1, 2, \dots,$

$k - 1$ ) 乘以相应的权值  $(\log_2 k)^{-(n-1)}$  ( $n = 1, 2, \dots, k - 1$ ), 因此定义类分离度  $S_i$  为

$$S_i = \sum_{n=1}^{k-1} (\log_2 k)^{-(n-1)} \cdot d_i^n \quad (n = 1, 2, \dots, k - 1)$$

(5)

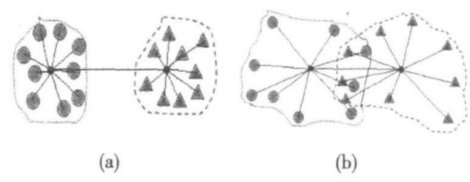


图 1 类分布图  
Fig 1 Location of classes

2.2.2 算法思想及程序步骤

在每次对  $k$  类训练样本进行训练生成二叉树结构时,首先是将类分离度最小的两类聚为一个新的类簇  $G$  得到一个新的父结点,同时训练生成一个子 SVM分类器.然后同理再对新类和其余  $k - 2$  类中类分离度最小的两类聚为新类  $H$  及另一个子 SVM分类器,直至最终得到二叉树的根结点,即训练完成.对测试样本的分类过程,为训练过程的逆方向,从根结点进行判断,经相应结点的 SVM分类器分类后得到的下一级结点,若是叶子结点,则找到了样本所属类别,否则继续计算,直到找到叶子结点为止.具体算法流程如下.

- (1) 在特征空间,对于每个类,都会存在  $k - 1$  个与其它类的距离值.根据式 (4) 计算类  $i$  与其它类  $j$  间的距离  $d_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, k$  且  $i \neq j$ ).
- (2) 对于第  $i$  类,将它与其它  $k - 1$  个类的距离  $d_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, k$  且  $i \neq j$ ) 值按从小到大的顺序排列,并重新编号为:  $d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d^{k-1}$ .
- (3) 根据式 (5) 计算第  $i$  类的类分离度.
- (4) 得到每个类的类分离度后,通过聚类的方法,首先将类分离度最小的两个类进行训练得到 SVM子分类器 SVM\_1,并将这两个类合并成一个新的簇  $G$  同理对新簇  $G$  和剩下的  $k - 2$  类进行类分离度的计算,将类分离度最小的两类训练得到 SVM子分类器 SVM\_2 并合并成新簇  $H$  直至得到  $k - 1$  个 SVM分类器,此时训练结束,并得到良好的二叉树的分类结构.
- (5) 对待测样本进行分类决策,在第 4 步形成的二叉树的根节点处利用 SVM子分类器测试,若属于左节点,则判断该节点是否是叶节点 (即层级为 0).若是,则转第 8 步;若不是,则转第 6 步.
- (6) 利用该节点的 SVM子分类器进行判决,确

定待测样本属于该结点下一级左结点还是右结点。

(7)判断第 6 步的左结点 (或右结点) 是否为叶结点, 若是, 则转第 8 步; 若不是, 则转第 6 步。

(8)找到样本所属类别, 程序结束。

3 试验及结果分析

采用东方汽轮机厂的电站锅炉的 X-Ray 图像进行分析, 其缺陷原始图像及经过 Hausdorff 距离重建<sup>[14]</sup>后的图像见图 2 经 Hausdorff 距离重建后共得到 763 个缺陷样本数据, 包括气孔缺陷 146 个, 夹钨 124 个, 夹渣 126 个, 未焊透 122 个, 裂纹 122 个, 未熔合 123 个。

(5) 重心坐标相对焊缝中心的位置 (表 1)。

表 1 样本缺陷的特征参数

Table 1 Feature parameter of sample welding defect

| 缺陷类型  | 区域的密集度 C | 边缘平滑度 $R_v$ | 端部形态变化 T | 长宽比 $l_1/l_2$ | 重心坐标相对焊缝中心的位置 d |
|-------|----------|-------------|----------|---------------|-----------------|
| 气孔 1  | 0.1141   | 0.1171      | 0.4080   | 0.0009        | 0.8506          |
| 气孔 2  | 0.1372   | 0.0248      | 0.4853   | 0.0085        | 0.1313          |
| 气孔 3  | 0.1091   | 0.2318      | 0.5131   | 0.0021        | 0.8179          |
| 气孔 4  | 0.1278   | 0.2316      | 0.5739   | 0.0011        | 0.2199          |
| 气孔 5  | 0.1135   | 0.0331      | 0.4382   | 0.0232        | 0.7884          |
| 夹渣 1  | 0.01284  | 0.7726      | 0.4835   | 0.7125        | 0.1409          |
| 夹渣 2  | 0.2022   | 0.5434      | 0.4696   | 0.0046        | 0.5108          |
| 夹渣 3  | 0.0835   | 0.6886      | 0.5225   | 0.2310        | 0.0745          |
| 夹渣 4  | 0.0433   | 0.7292      | 0.4799   | 0.2919        | 0.0745          |
| 夹渣 5  | 0.2040   | 0.5857      | 0.1820   | 0.6288        | 0.82981         |
| 未熔合 1 | 0.0941   | 0.0189      | 0.7490   | 0.0474        | 0.3364          |
| 未熔合 2 | 0.0808   | 0.0110      | 0.6404   | 0.0722        | 0.4162          |
| 未熔合 3 | 0.0536   | 0.0629      | 0.6330   | 0.1295        | 0.4097          |

针对以上 5 个特征信息对得到的缺陷样本进行训练测试, 构建 SVM 决策树, 其中输入参数为 5 个, 对实际输入的特征参数必须进行归一化处理, 将其作为样本的输入向量,  $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_5)$ 。

其中分类器采用 SVM 其核函数采用径向基函数, 试验允许的容忍误差 0.001, 以气孔和夹渣的区分为例来说明交叉验证。计算结果得到不同的惩罚系数  $C_1$  和 RBF 核参数  $\sigma$  的计算结果为:  $C_1 = 4248.6018$  RBF 参数  $\sigma = 0.0009887$ 。

最后计算了气孔、夹钨、未焊透、夹渣、裂纹、未熔合的正确识别率, 还与其它算法进行了比较, 结果如表 2 所示。

表 2 最后的识别结果比较

Table 2 Comparison of identification results

| 类别   | 气孔 (%) | 夹钨 (%) | 夹渣 (%) | 未熔合 (%) | 未焊透 (%) | 裂纹 (%) |
|------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| 一对一  | 93     | 98     | 88     | 80      | 81      | 81     |
| 一对多  | 90     | 94     | 91     | 78      | 83      | 80     |
| 文中算法 | 96     | 100    | 92     | 89      | 87      | 88     |

图 2 X-Ray 缺陷原始图像和 Hausdorff 距离重建后图像

Fig. 2 X-Ray image of original defect and re-image through Hausdorff distance

焊接图像特征是区分焊接缺陷的关键点, 其中几何形状是判断焊接缺陷的最重要的依据。基于此将图像特征分为以下几类<sup>[2-15]</sup>: (1) 区域的密集度, (2) 边缘平滑度, (3) 端部形态变化, (4) 长宽比,

未熔合、未焊透、裂纹的识别率比较低。分析原因: 一方面可能是未熔合、未焊透、裂纹缺陷由于图像相对难以分割, 导致部分特征丢失, 增加了缺陷识别难度; 另一方面可能是由于待分类样本中正、负两类样本数目不平衡。由于支持向量机在待分类的样本集中正、负两类样本数目大致相等的情况下, 能取得较好的分类结果。但在实际分类问题中, 待分两类中一类的样本数目大于另一类的样本数目, 待分

样本数据是不平衡数据集, 容易导致错误的分类结果.

4 结 论

(1) 算法定义了一种新的类间距离, 能够有效解决在具有类交叉情况下采用欧式距离计算分类的不足.

(2) 综合考虑了其余各样本对待测样本类分离度的影响, 根据文中定义的分类分离度表达式, 基于聚类思想, 通过设计权重, 建立了一种改进的二叉树多分类 SVM 算法, 并得到了一个结构平衡的二叉树结构的 SVM 分类器.

(3) 在与其它多分类 SVM 精度比较后, 表明改进后的二叉树多分类 SVM 算法较其它 SVM 多分类算法具有更高的分类精度和具有较好的推广性.

参考文献:

[ 1 ] 中国机械工程学会. 射线检测[ M]. 北京: 机械工业出版社, 1997

[ 2 ] 张晓光 林家骏. X射线检测焊缝的图像处理与缺陷识别[ J]. 华东理工大学学报, 2004 30(2): 199—202  
Zhang Xiaoguang Lin Jiajun. Research of image processing and defect recognition for industrial radiographic weld inspection[ J]. Journal of East China University of Science and Technology 2004 30(2): 199—202

[ 3 ] 邹怡蓉 吴哲明, 郭桂林, 等. 基于图像色彩信息的焊缝识别算法[ J]. 焊接学报, 2009 30(10): 37—40  
Zou Yirong Wu Zheming Guo Guilin et al. The weld image recognition algorithm based on color information[ J]. Transactions of the China Welding Institution 2009 30(10): 37—40

[ 4 ] 丁度坤, 高向东, 赵传敏. 计算机视觉焊缝识别技术研究[ J]. 焊接技术, 2006 6(35): 19—21.  
Ding Dukun Gao Xiangdong Zhao Chuamin. Study on the weld detection technology based on computer vision[ J]. Welding Technology 2006 6(35): 19—21

[ 5 ] Nacereddine Naï Drari Redouane. Weld defect extraction and classification in radiographic testing based artificial neural network[ C] // Proceeding of 15 th WCNDT ROMA 2000 6—

10

[ 6 ] Kapustin A E Barlusova I J. Computer technologies and X-ray flaw detection of welds[ C] // Proceeding of 15 th WCNDT ROMA 2000 16—20

[ 7 ] Nacereddine Naï Tridim. Weld defects in industrial radiography based invariant attributes and neural networks[ J]. Image and Signal Processing and Analysis 2005(7): 88—93.

[ 8 ] 蒋芸, 李战怀. 基于改进的 SVM 分类器的医学图像分类新方法[ J]. 计算机应用研究, 2008 25(1): 53—55.  
Jiang Yun Li Zhanhui. New medical image classify approach based on improved SVM classifier[ J]. Application Research of Computers 2008 25(1): 53—55

[ 9 ] 谢红梅, 连宇, 彭进业. 基于 Ncut 分割和 SVM 分类器的医学图像分类算法[ J]. 数据采集与处理, 2009 24(6): 735—737.  
Xie Hongmei Lian Yu Peng Jinye. Ncut based segmentation and SVM classifier for medical image classification[ J]. Journal of Data Acquisition & Processing 2009 24(6): 735—737

[ 10 ] Trevor Hastie Robert Tibshirani Jerome Friedman. The elements of statistical learning data mining inference and prediction[ M]. American Springer Verlag 2004

[ 11 ] Rik in R. Clauau A. In defense of one vs. all classification[ J]. Journal of Machine Learning Research 2004 5 101—141.

[ 12 ] Debnath R Takahide N Takahashi H. A decision based one a gainst one method for multi class support vector machine[ J]. Pattern Analysis and Application 2004 7(2): 164—175

[ 13 ] Takahashi F Abe S. Decision tree based multiclass support vector machines[ C] // Proceedings of 9 th International Conference on Neural Information Processing Washington D C USA 2002 1418—1422

[ 14 ] 罗爱民, 殷国富, 魏万迎, 等. 基于 Hausdorff 距离区域生长的缺陷边缘重建方法[ J]. 机械工程学报, 2007 43(4): 132—137.  
Luo Aimin Yin Guofu Wei Wanying et al. Method of defect edge reconstruction based on region growing algorithm and the Hausdorff distance[ J]. Journal of Mechanical Engineering 2007 43(4): 132—137

[ 15 ] Kato Y Okumura T Itoga K et al. Development of the automatic system for radiographic film interpretation[ J]. NDT of Japan 1992 41(4): 186—195

作者简介: 罗爱民 男, 1971 年出生, 博士. 主要从事无损检测及三维重建方面研究. 发表论文 20 篇.  
Email: luojiaimin@163.com

frequency respond of sound track. Based on the above analysis, the linear generation model of arc sound was set up. The linear prediction coefficients (LPC)  $\{a_i\}$ , reflection coefficients and logarithm area ratio coefficients were extracted by Levinson-Durbin algorithm. In addition, the combined characteristic vector of arc sound signal was constructed.

**Key words:** linear prediction analysis; MIG welding; arc sound; feature extraction

**Analysis on calculation accuracy and efficiency of multi-pass butt weld of pipe** YU Xingzhé, ZHAO Haiyan, LIU Li, LIN Jiean (1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University & Key Laboratory for Advanced Manufacturing by Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). P 39—42

**Abstract:** The influence of segments heat source and mesh size on calculation accuracy and efficiency of 3-D EFA of multi-pass butt welded pipe were investigated. The methods can meet the demand of calculation accuracy and high efficiency of 3D finite element simulation of large pipes. The results show that the mesh size below or equals to 3 mm can meet the accuracy requirement. The segment heat source, which has little efficiencies on calculation accuracy, can improve the calculations efficiency greatly.

**Key words:** SUS04; multi-pass butt welding; segment heat source; mesh size

**Simulation of solidification microstructure evolution in molten pool of nickel base alloy** MA Rui, DONG Zhibo, WEI Yanhong, ZHAN Xiaohong (1. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China). P 43—46

**Abstract:** A coupled model of cellular automaton and finite difference was established and applied to solidification process in molten pool of nickel base alloy. The growth of various solidification microstructures, including planar crystal, cellular crystal, columnar dendritic crystal and crystal equiaxed dendritic in molten pool was firstly carried out and contrasted with experiment results. Moreover, variation in solidification mode in molten pool was performed, which represented cellular to dendritic and columnar to equiaxed transitions. The effect of diffusion on the distribution of solute was also calculated by solute diffusion model. The simulation results were in good accordance with the experiment results.

**Key words:** microstructure evolution; cellular automaton; solute segregation

**Microstructural analysis of weld metal microstructures in a low carbon high strength microalloyed steel** WEI Ran, WU Kaiping (Hubei Provincial Key Laboratory for System Science on Metallurgical Processing, Wuhan University of Science

and Technology, Wuhan 430081, China). P 47—50

**Abstract:** Microstructural observations and analysis of weld metal in a 800 MPa grade low carbon high strength microalloyed steel are studied by means of optical microscopy, SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy-Electron Dispersed Spectrum) and EBSD (Electron Backscattering Diffraction). The weld metal consists of bainite and acicular ferrite. Acicular ferrite laths or plates are nucleated on inclusions which consisted of an  $Al_2O_3$  core and an outer layer of titanium oxide. Although multi-variant ferrite plates emanate radially from an inclusion, there are only some of them could elongate rapidly. It indicates growth direction of acicular ferrite preferred orientation. Results of EBSD analysis also indicate that the acicular ferrite grains in weld metal are not crystallographically oriented randomly, probably a certain orientation relationship being kept. Those acicular ferrite laths or plates nucleated on inclusions grown in opposite direction have the same orientation relationship, presumably because they have a Kurdjumov-Sachs (K-S) orientation relationship with the prior austenite grains.

**Key words:** high strength low alloy steel; weld metal; acicular ferrite; electron backscattered diffraction

**Method of multi-classification by improved binary tree based on SVM for welding defects recognition** LIU Amin, SHEN Caihong, YIBing, LI Kun (1. School of Light Industry and Food, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Luzhou Lao Jiao Co., Ltd., Luzhou 646000, Sichuan, China; 3. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China). P 51—54

**Abstract:** To further recognition accuracy, the multi-classification by improved binary tree based on SVM is raised for welding defects recognition. In the welding defects classification, each class separation is computed, the classes of the two smallest class separation are trained to generate the sub-classification SVM<sub>1</sub> and then are combined into a new cluster G. The new cluster G and the remaining classes are computed similarly and the second sub-classification SVM<sub>2</sub> and new merged cluster H are produced. This work would be repeated until the (k-1)-th sub-classification SVM is obtained and finally a balanced binary tree is come into being. Then, the optimized binary tree based on SVM by clustering is applied in welding defects recognition. The experiments show high recognition accuracy and strong generalization ability by our new algorithm.

**Key words:** support vector machine; class separation; binary tree; welding defects recognition

**A novel high-power inverter-based resistance spot welding power supply** ZENG Min, MA Cheng, CAO Biao, FAN Fengxin (School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). P 55—58

**Abstract:** To meet the welding requirements of the new materials with low resistance, a digital powerful medium frequency inverter-based resistance spot welding power is designed with