

# 基于模糊神经网络的焊缝缺陷识别的研究

唐国维, 巩 淼, 张方舟, 李 想, 严胡勇

(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘 要:** 焊缝缺陷在 X 射线设备下成像转成数字图像后, 分析其图像的特点, 进行缺陷的定位与边缘检测, 结合人工识别焊缝缺陷的经验选取对焊缝缺陷分类影响因子较大的特征参数。用模糊集合的概念描述特征参数, 建立特征参数的模糊规则库, 构建以模糊化后的特征参数为输入层, 以模糊规则为隐含层, 缺陷预知识识别分类为输出的模糊神经网络模型。分析实验结果, 成功定位缺陷在数字图像中的大概位置与边缘检测。该方法提高了集合交叉较大的焊缝缺陷的识别率, 能有效地对缺陷进行识别分类。

**关键词:** 焊缝缺陷; 图像处理; 模糊; 缺陷选取; 神经网络

中图分类号: TC441.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)05-0243-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.060

## Research on Weld Defects Distinguishing Based on Fuzzy Neural Networks

TANG Guo-wei, GONG Miao, ZHANG Fang-zhou, LI Xiang, YAN Hu-yong

(College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** After weld defection is converted to digital images under the X-ray equipment, analyze the characteristics of the images for locating defects and detecting edges, select the characteristic parameters, which have larger impact on weld defect classification combined with the experience of artificial identification. Describe the characteristic parameters in the concept of fuzzy set, and establish the fuzzy rule base of characteristic parameters, building the fuzzy neural network model with the fuzzy characteristic parameters as the input layer, and fuzzy rules as the implied layer, and the identification and classification of defecting prediction as output. Analysis of test results show it can successfully locate the defects about position and edge detection in digital images. The method improves the recognition rate of the larger crossed set of weld defection, which can identify the classification effectively.

**Key words:** weld defect; image processing; fuzzy; defects selection; neural network

## 0 引言

目前 X 射线检测技术被广泛应用在现代工艺的无损检测中, 特别是在焊缝缺陷识别领域, 已成为必不可少的过程<sup>[1]</sup>。以往人工评片的过程中常常会掺杂个人的主观因素, 无损检测在不损伤焊件产品的前提下, 确保评片的规范性、准确性、稳定性, 减少了人工检测的偶然性及人的主观性。孙林等将支持向量机的识别方法应用在焊缝缺陷识别中, 将 X 射线图像处理、提取缺陷特征, 再根据焊缝缺陷样本的特点建立 SVM “一对一” 聚类结构进而对样本识别<sup>[2]</sup>。虽然该方法识别的速度快但构建机构模型较复杂。钟映春用决策树对焊缝缺陷类型进行识别, 在对焊缝射线底片进行

图像去噪和图像增强的基础上, 对焊缝底片图像进行二值化处理, 进而提取焊缝缺陷图像及其特征, 再采用决策树方法建立焊缝缺陷特征的分类规则, 并用这些规则对二值化后的焊缝缺陷图像进行分类识别<sup>[3]</sup>。决策树的方式在一定程度上能识别出特征较明显的焊缝缺陷, 对于缺陷类型的特征差异不明显的误识率较高。清华大学的任大海、尤政等设计了基于灰度梯度的焊缝边界提取方法并提出了提取结果相关性修正的概念及算法并对缺陷类型识别方法进行了研究<sup>[4]</sup>。这种识别方式, 在一定程度上提高了识别率, 但对于缺陷类别较模糊特征的描述有待改进。

大部分的焊缝缺陷识别研究都是将焊缝缺陷提取后<sup>[5]</sup>, 将数字图像中的焊缝缺陷信息数据转化为准确

收稿日期: 2013-07-24

修回日期: 2013-10-29

网络出版时间: 2014-02-11

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2012D-5006-0609); 黑龙江省教育科学技术研究项目(11551016, 12521050)

作者简介: 唐国维(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向为图像处理与模式识别。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140211.1617.043.html>

的逻辑值进行计算、判别。由于焊缝缺陷信息数据绝大部分都不是可以明确地界定于逻辑值之间,这样得出的结果与实际的情况会有很大的差异。针对焊缝本身的模糊性,文中将模糊理论运用到焊缝缺陷识别当中,结合焊缝缺陷实际的模糊性,用模糊集对焊缝缺陷不确定参数进行描述,再聚类分析识别焊缝缺陷。

## 1 模糊模式识别技术

### 1.1 焊缝缺陷的定位与边缘检测

焊缝缺陷图像在经过去噪处理后,图像变得清晰明显<sup>[6]</sup>,去除了成像过程中各种电磁波等干扰产生的噪声,这种噪声一般具有离散性、颗粒状特征。尽可能地不损伤到焊缝区域的边缘轮廓,保存对缺陷检测影响较大的信息。

缺陷在射线检测的图像中的大概位置,对于判别焊缝缺陷的类别十分重要。图像中的灰度分布是缺陷的一个显著特征。图像中的目标区域与背景的灰度差值变化不大,灰度级函数图像没有明显的峰到谷,谷到峰的突变。对于这种图像,通过分析函数的特点,峰值、谷值出现的规律,判定缺陷在图像中的大概位置,然后对图像做分割处理。

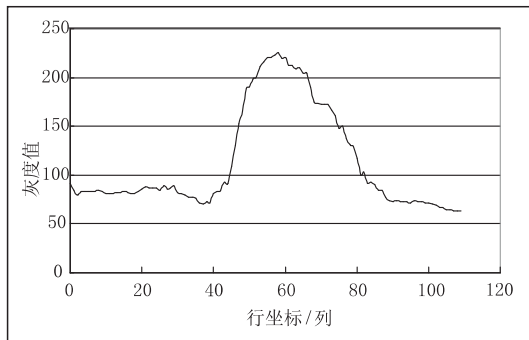


图 1 120 坐标处列灰度分布图

经过大量的数据调研,焊缝图像的列灰度值函数曲线近似于开口向下的抛物线<sup>[7-9]</sup>,如图 1 所示。若经过缺陷则图像如图 2 所示。一列的灰度分布并不是特别的平滑,图像去噪、平滑处理后仍然会存在微小的噪声颗粒,灰度分布曲线会有无规则、小的起伏,但不影响整体的图像走势。图像背景区域的灰度值较小,焊缝区域的灰度值较大,而缺陷目标区域的灰度值较小。人眼感觉的就是一个由暗的区域到较亮区域的渐变,如果含有缺陷,在较亮区域中包含小的暗状区域。对焊缝列灰度级曲线进行分析,当该曲线中含有 0 个谷值,只包含 1 个峰值说明该列灰度分布曲线符合无缺陷分布规律;否则,若含有 1 个或 1 个以上谷值,且多于 1 个峰值则可判定此列穿过焊缝缺陷。通过判断谷值个数大于等于 0 个(或者判断峰值是否大于 1 个),保留 0 个谷值的列(要是峰值则保留峰值个数不

小于等于 1 个的列)。将图像中其余列的灰度值置为 255。用白色作为间隔将焊缝图像分割为含有缺陷图像的条状子图像。

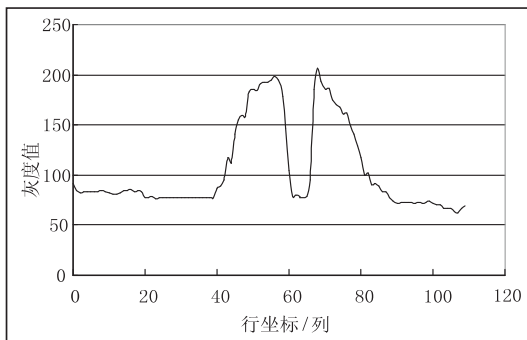


图 2 350 坐标处列灰度分布图

经过分析图像的列灰度分布情况,确定了焊缝缺陷所在列的大概位置,但不能确定缺陷所在行的大概位置。再分析图像的行灰度值分布情况,在没有扫描过缺陷时,一行的灰度分布基本是趋近于一条直线,即使有一定的波动,灰度也是在一条直线的附近散列。当这行穿过缺陷区域,函数图像会呈现很大的、跳跃性间断,不可拟合成直线。扫描图像后,保留有跳跃性间断的行,将图像中其余行的灰度值置为 255。经过分析行灰度分布情况,能确定缺陷所跨行的范围。综合分析列灰度与行灰度分布情况,判断出缺陷出现的大概位置。

图像经过上述处理后,确定了缺陷出现的大概位置,为了保证缺陷边缘不间断,选取的区域需外扩几个像素。没有缺陷的图像中,灰度分布比较平稳,灰度值相差不大,相邻的像素间的一阶导数的值趋近于 0。缺陷边缘附近的像素点的灰度值变化很强烈,像素点之间的一阶导数的值较大。设定相应合理的阈值,如果两像素点间的一阶导数的值大于该阈值,则为缺陷边界。为此,考虑用 Sobel 算子对图像作边缘检测。首先,用 Sobel 算子求得各个像素边缘之间的平均强度值作为阈值  $T$ 。

$$T = \frac{\sum \Delta_{ij} f(i, j)}{\sum \Delta_{ij}}$$

再求相邻像素之间一阶导数值,用阈值对该导数值进行分割。当导数值小于等于阈值  $T$  时,则设为 0,大于阈值为 255。

$$f(i, j) = \begin{cases} 255 & \text{当 } f(i, j) > T \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } f(i, j) \leq T \text{ 时} \end{cases}$$

### 1.2 选取缺陷的特征参数

焊缝缺陷的成因各异:坡口边缘不干净,含有水渍、油污等都会导致产生气孔,造成焊缝中的气孔缺陷;若焊接过程中电流较小、进丝快、焊条直径过大则可能形成未焊透缺陷<sup>[10]</sup>。焊缝缺陷的形式复杂多样,

根据缺陷的成因、特点将焊缝缺陷大致分为六类:裂缝、气孔、夹渣、未焊透、未熔合、钨夹渣。若不属于上述几类缺陷则视为伪缺陷。缺陷的类别与特征参数的关系并不是十分明确,而焊缝缺陷特征的模糊性、离散性比较强。因此,不能完全用数学公式对缺陷的特征进行量化。人们对焊缝缺陷特征的判断,在潜意识里往往是以周围的事物作为参照物,判断的过程中还会综合个人的专业知识与经验。例如:判断缺陷的灰度值时,人们用周围的背景作对比会给出亮与暗或黑与白的判断<sup>[11]</sup>。判断缺陷的两端尖锐度是人们通过在生活中、工作中积累的经验与常识匹配来确定的,一般描述为尖锐、较尖锐、不尖锐。同样,判断焊缝缺陷的形状、缺陷相对于焊缝中心线的位置等一系列的特征也是相似的原理。由此可见,人们在判断焊缝缺陷的类别时,通过人眼收集对确定缺陷类别有影响的特征值,必要时需使用辅助工具,人脑再对这些特征值进行模糊判断,再以相应的专业知识、评判标准对缺陷分类识别。

文中是基于模糊识别的焊缝缺陷识别的研究,焊缝图像经过前期的预处理、图像分割、边缘检测等提取缺陷的特征值。选取缺陷特征相对灰度、缺陷相对位置、两边尖锐度、长短径之比、周长面积比值、填充度指数、长径两边面积比、夹角作为缺陷规则库。元素值之间的界定并不明确,对于这种不精确的情况,文中采用模糊集合论的方式,表达缺陷特征参数的值。

缺陷特征中的相对灰度,特征集合的元素值是: {白色,黑色};缺陷特征中的形状,特征集合的元素值是 {短粗,细长,较圆};缺陷特征中的位置,特征集合的元素值是 {中心,较中心,边缘} 等。

焊缝特征参数定义如表 1。

1.3 基于模糊模式的缺陷判定

1.3.1 焊缝缺陷识别系统的结构

待检焊件经过 X 射线成像设备成像后,将焊缝图像数字化并存储在专用计算机中,再进行图像的预处理,提取对焊缝缺陷识别影响因子大的特征,识别焊缝缺陷,系统识别流程如图 3。

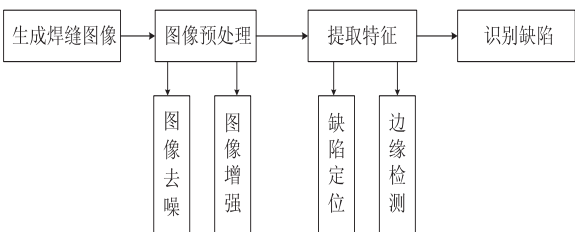


图 3 焊缝缺陷识别系统结构图

1.3.2 焊缝缺陷特征的隶属度

在客观世界中,人们在判断事物的归属类别时,如果完全用“是”与“不是”做定论,会影响事实的偏差。

在图像特征的判别上也是一样。例如,对于数字图像中像素所属类别的判定上,一定程度上可以属于 A 类,在一定的比例上属于 B 类。引用模糊集的概念就能很好地解决这个问题。每一个特征参数隶属度采用  $\pi$  函数来确定<sup>[12]</sup>。该函数定义如下:

$$\pi(r,c,\lambda)=\begin{cases}2\left[1-\frac{r-c}{\lambda}\right]^2 & \frac{\lambda}{2}\leq r-c\leq \lambda \\ 1-2\left[\frac{r-c}{\lambda}\right]^2 & 0\leq r-c\leq \frac{\lambda}{2} \\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

函数中  $c$  为中心点值,  $\lambda$  为半径值。

表 1 特征向量示意表

编号	特征向量名称	特征示意图	特征向量意义
1	相对灰度		缺陷区域平均灰度值 Gray (A) 与外扩区域平均灰度值 Gray (B) 之比描述缺陷亮暗
2	相对位置		缺陷重心到焊缝重心的距离与焊缝宽度之比描述缺陷在焊缝中的位置
3	两边尖锐度		缺陷长径两边 1/4 段的面积(S <sub>1</sub> 和 S <sub>2</sub> )与焊缝总面积之比中较小的一个,描述缺陷两端的形状
4	长短径之比		缺陷的长径与短径的长度比描述缺陷形状
5	周长面积比值		Par=P <sup>2</sup> /S
6	填充度指数		缺陷的面积与外扩区域的面积比 com=S/(L <sub>y</sub> *L <sub>x</sub> )
7	长径两边面积比		长径两边面积比 S <sub>3</sub> /S <sub>4</sub>
8	夹角		缺陷长径与焊缝中心线的夹角 Ang

用模式元素来描述特征参数值,模糊子集表示为 {背离(L),较符合(M),符合(B)}, 每一个选取的特征参数值  $X_i = (1,2,\cdots,8)$ ,运算的过程中每个特征量都存在一个最佳变值  $X_{i0}$ 。特征参数值的上界值为  $X_{i\max}$ ,下界值为  $X_{i\min}$ ,则确定隶属函数为:

$$\begin{aligned}\mu_{iM} &= \pi(e_i, C_M, \lambda_M) \\ \mu_{iL} &= \pi(e_i, C_L, \lambda_L) \\ \mu_{iB} &= \pi(e_i, C_B, \lambda_B)\end{aligned}$$

其中:  $\lambda_M = 0.5(X_{i\max} - X_{i\min})$ ;  $C_M = X_{i\min} + \lambda_M$ ;  $\lambda_L = (C_M - X_{i\min})/X_d$ ;  $C_L = C_M - 0.5\lambda_L$ ;  $\lambda_B = (X_{i\max} - C_M)/X_d$ ;  $C_B = C_M + 0.5\lambda_B$ 。

式中,  $X_d$  表示临近的特征变量的模糊集间的交叉度的参数,选取相应的  $C, \lambda$ ,可以确保  $\mu_{iM}, \mu_{iL}, \mu_{iB}$  中的至少一个值大于 0.5。

对于没有具体量值的特征向量的隶属度表示如



下:

背离(L) { \frac{0.95}{L}, \frac{0.6}{M}, \frac{0.05}{B} } ;

较符合(M) { \frac{0.7}{L}, \frac{0.95}{M}, \frac{0.7}{B} } ;

符合(B) { \frac{0.05}{L}, \frac{0.6}{M}, \frac{0.95}{B} } ;

不确定信息为: { \frac{0.5}{L}, \frac{0.5}{M}, \frac{0.5}{B} } 。

特征参数模糊化后为:  $X_i = [\mu_{1L}, \mu_{1M}, \mu_{1B}, \cdots, \mu_{8L}, \mu_{8M}, \mu_{8B}]$ 。

特征变量用模糊集量化后,作为神经网络的输入层,用模糊规则库作为神经网络的隐含层,将缺陷判定的预知类别作为神经网络的输出层。用模糊模式对界限不明确的焊缝缺陷类别进行分类,利用神经网络的学习能力,达到要求的焊缝缺陷识别精度。神经网络如图 4。

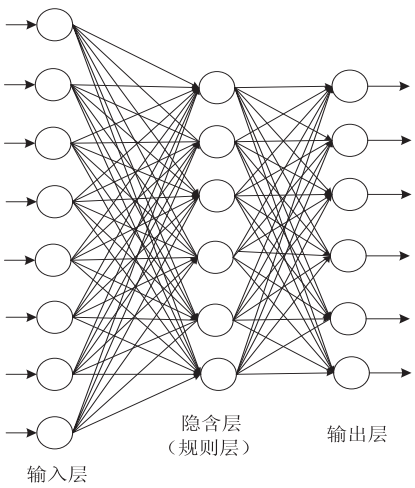


图 4 模糊神经网络结构图

依据相应的评定标准《GB6417-86 金属熔化焊缝缺陷分类和说明》<sup>[13]</sup> 及经验建立焊缝缺陷模糊规则库。利用模糊隶属度描述焊缝缺陷中的不明确部分,用模糊规则库对特征向量的输入进行约束,结合神经网络的学习功能不断地增加精确度,直到输出值满足要求。

2 实验结果与分析

文中选取对焊缝缺陷分类影响因子较大的八个特征参数:相对灰度、缺陷形状、两边尖锐度、相对位置、走向趋势、线型、长短径之比、边缘。将特征用模糊集的概念进行量化后,组成输入参数。根据模糊规则判断焊缝图像是否含有缺陷。

利用模糊神经网络识别前,现将 75 张典型的单类焊缝缺陷样本进行学习训练。选取 10 张焊缝 X 射线底片作为测试集,适当地选取质量较好的图片,每张图片中含有单类待测缺陷。训练样本中包括 9 个气孔缺

陷、15 个裂缝缺陷、10 个条状夹渣缺陷、5 个钨夹渣缺陷、18 个未焊透缺陷及 18 个未熔合缺陷。对于焊缝缺陷类别中,模糊子集交叉比较大的,可适当地选取较多的典型的单类焊缝缺陷样本进行训练,能进一步地提高识别的准确度。识别结果如表 2。

表 2 单类焊缝缺陷样本测试结果

缺陷类别	训练样本	测试样本	结果统计
气孔	9	1	Y
裂缝	15	2	Y
未焊透	18	2	一个误识别成未熔合
钨夹渣	5	2	Y
未熔合	18	2	Y
条状夹渣	10	1	Y
数量/个	75	10	

用样本数据对构建好的模糊神经网络进行训练,再用测试样本测试网络的识别效果,发现 10 个测试样本中出现了一个识别错误,将未焊透误识别成未熔合。而对于特征明显的焊缝缺陷识别准确度较高,例如对于钨夹渣缺陷的识别率达到 100%。选取 55 张复杂类焊缝缺陷样本进行测试,其中含有 149 个不定缺陷。输入到网络中进行识别分类。

从识别结果中得出网络对特征明显的钨夹渣识别准确度很高,能达到 100%。对于特征集合交叉比较大的类别识别率较低。例如未焊透与未熔合缺陷,识别率分别为 92.30%、88.46%。焊缝缺陷的错误识别还与特征选取的准确程度,训练样本的多少相关。

3 结束语

实验结果表明,用模糊集合的概念描述选取的焊缝缺陷特征参数,使理论更能符合客观实际,将其作为神经网络的输入层;分析各个特征之前的关联关系,建立相应的模糊规则库,作为神经网络的隐含层;神经网络的输出层的分支对应着焊缝缺陷的 6 个类别。对特征参数以及算法进行模糊化,约束神经网络的输入层与规则层,利用神经网络的学习分类能力将模糊神经网络应用于焊缝缺陷识别中是可行的。

参考文献:

[1] 韦全芳,韩 焱,张开增,等. 基于广义模糊算子的焊缝图像的缺陷提取[J]. 信息技术,2004,28(12):50-52.  
[2] 孙 林,杨世元,吴德会. X 射线底片焊缝缺陷的支持向量机识别方法[J]. 应用科学学报,2008,26(4):418-424.  
[3] 钟映春. 基于决策树的焊缝缺陷类型识别研究[J]. 计算机工程与应用,2008,44(20):226-228.  
[4] 任大海,尤 政,孙长库,等. 焊接缺陷实时成像自动检测技术的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41

(2);25–29.

[5] 杨燕萍,杨清平,金顺敬,等. 焊缝缺陷模式识别以及焊缝缺陷检测数据库[J]. 浙江建筑,2008,25(11):65–69.

[6] 王保平,刘怀亮,李南京,等. 一种新的自适应图像模糊增强算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2005,32(2):307–313.

[7] Daum W, Rose P, Heidt H, et al. Automatic recognition of weld defects in X-ray inspection[J]. British Journal of NDT, 1987,29(2):79–82.

[8] Liao T W, Ni Jiawei. An automated radiographic NDT system for weld inspection: part I–weld extraction[J]. NDT & E International,1996,29(3):157–162.

[9] 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.

[10] 李晨光. 管道焊缝无损检测的综合方法结合及图像处理[D]. 北京:中国石油大学,2012.

[11] 王俊涛,宋永伦,李建伟. 基于模糊规则库推理的 X 射线底片焊缝缺陷识别[J]. 现代制造工程,2005(5):101–103.

[12] Pal S K, Mitra S. Multi-layer perception, fuzzy sets and classification[J]. IEEE Trans on Neural Networks,1992,3(5):683–697.

[13] 许 鹏. 输油管道连接焊缝典型缺陷分类及损伤识别[D]. 沈阳:东北大学,2009.

# 2014 全国第十二届嵌入式系统学术会议

## ( ESTC 2014) 征文通知

全国嵌入式系统学术会议(ESTC)是由中国计算机学会主办的 CCF 微机(嵌入式系统)专委会年度学术会议,自 2001 年以来已经成功举办了十届,已成为嵌入式系统及相关领域的专家、学者、业界人士以及研究生进行学术交流、产学互动的重要学术会议。2014 年全国嵌入式系统学术会议将于 2014 年 9 月 21 日--22 日,在湖南长沙,由 CCF 微机(嵌入式系统)专委和湖南大学、湖南省计算机学会共同承办。

ESTC 2014 以“嵌入式系统与高性能计算”为主题。会议旨在讨论嵌入式系统领域的最新研究成果和发展趋势,开展广泛的学术交流和研讨。会议将邀请院士、国内外著名专家作大会主题报告。欢迎从事嵌入式系统及相关领域的专家、学者、业界人士、研究生踊跃投稿并参加会议。

征文范围包括但不限于以下方向:

- ◆嵌入式软件工程及开发方法

◆高可信嵌入式系统

◆软硬件协同设计

◆嵌入式系统的绿色设计技术

◆嵌入式系统应用技术(绿色电子系统、智能终端、数字家电、汽车电子、智能电网、航天及应用电子等)
- ◆嵌入式操作系统与中间技术

◆高性能嵌入式系统结构

◆嵌入式系统设计方法

◆嵌入式系统专业课程建设
- ◆多核系统,多核异构并行处理

◆嵌入式微处理器与 SOC 技术

◆嵌入式系统教学教育研究等

会议内容与形式:

ESTC 2014 除了举办学术会议(含主题报告、论文报告)之外,还将举办讨论会(Panels)、技术论坛、工业界报告以及系统演示等。

重要信息:

- 投稿邮箱:estc2014@hnu.edu.cn

● 投稿截止时间:2014 年 6 月 20 日 24 时(北京时间)

● 投稿须知:接受中文与英文投稿,论文形式可以为:长文(5–8 页)、短文(3–4 页)、Poster(1–2 页),中文论文应包括英文题目及英文摘要
- 录用通知日期:2014 年 8 月 30 日
- 论文出版:大会论文集将由中国计算机学会会刊《计算机技术与发展》杂志社正式出版,优秀论文将推荐至《计算机学报》(3 篇)、《软件学报》(3~5 篇)、《电子学报》、《通信学报》、《计算机研究与发展》(2~3 篇)、《湖南大学学报》(10~15 篇,EI 检索)、《计算机软件与应用》(5~7 篇)、Springer CCIS(EI 检索)等优秀期刊。

在各期刊正式发表前,作者需根据审稿意见,对论文进行修改,并在大会作口头报告。

联系人:徐成 cheng\_xu@yeah.net      网址:esnl.hnu.edu.cn/estc2014

基于模糊神经网络的焊缝缺陷识别的研究

作者：

唐国维， 巩淼， 张方舟， 李想， 严胡勇， [TANG Guo-wei](#), [GONG Miao](#), [ZHANG Fang-zhou](#), [LI Xiang](#), [YAN Hu-yong](#)

作者单位：

东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆, 163318

刊名：

计算机技术与发展 

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2014(5)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201405060.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405060.aspx)