

# 油气管道缺陷检测的数据处理方法回顾与展望

郑贤斌, 陈国明, 袁超红

(中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**油气管道缺陷检测中的数据处理方法主要包括传统的处理方法,如谱分析、统计分析,以及后来发展起来并广泛应用的小波分析、自适应滤波处理、支持向量机、人工神经网络、模式识别、数据融合等新方法。本文分析了各种用于管道缺陷检测的数据处理方法的优缺点,并指出当前研究中所存在的问题。最后探讨了这一领域中可能的发展方向。

**关键词:**油气管道;缺陷;检测;数据处理

中图分类号:TE973.6 文献标识码:A 文章编号:1001-4837(2005)10-0038-06

## A Review on Processing Approaches about Defect Data in Inspection of the Oil and Gas Pipeline

ZHENG Xian-bin, CHEN Guo-ming, YUAN Chao-hong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:**The processing approaches about defect data in inspection of the oil and gas pipeline are reviewed, which comprise the traditional data processing, such as spectral analysis, statistical analysis, and wavelet analysis, adaptive filtering technique, statistical processing, support vector machine, artificial neural network, pattern recognition, data fusion, et al, which are developed. After analysing their advantages and disadvantages, the paper provides the problems of the processing approaches about defect data in inspection of the oil and gas pipeline. Finally, some research tendencies in this field are presented.

**Key words:**oil and gas pipeline; defect; inspection; data processing

### 1 引言

管道缺陷检测技术是一种重要的油气管道安全保障技术。一般地管道检测过程会获得大量的原始数据,对这些数据必须采用有效的数据处理方法进行处理,其原因主要是:用来描述缺陷的特征参数都隐含在原始数据中,检测获得的原始数据中所蕴含的信息必须通过适当方法的识别、处理才能显示出它们的价值,给检测者提供有效的结论;通常在检测

过程中所得到的数据量都非常大,而且很不规整,数据分析的任务繁重,适当的数据处理方法可以提高结果判断的速度;检测过程中不可避免会受到噪声、设备测量误差等因素的影响,采用适当的数据处理方法可以使其影响降至最低,从而提高检测的准确度。因此,高效、可靠的数据处理方法在管道缺陷检测和识别系统中处于十分重要的地位,很大程度上决定了检测技术的应用效果。

## 2 油气管道缺陷检测的数据处理方法

### 2.1 传统的数据处理方法

传统的数据处理方法有数种,如谱分析、统计分析和贴近度分析等。作为最基本的数据处理方法之一的统计分析是利用统计学、概率论的原理对关系中各属性进行统计分析,从而找出它们之间的关系和规律。常用方法:判别分析、因子分析、相关分析、多元回归分析、聚类分析、主成分分析等<sup>[1]</sup>。为了定量地揭示各种缺陷要素之间的相互关系,可采用以概率论和数理统计为基础的统计分析方法进行深入研究。在数据处理领域,统计分析方法可用于分类和聚类处理。相关分析法对高维特征集进行初选,确定出维数较低的各特征间互不相关的特征子集,然后再用其他方法对其进行精选,能够减小运算量。如相关检漏分析综合了振动、测试、信号处理等技术,其实质是在时延域中考察两个信号间的相似性。以泄漏检测为例,油气管道壁一般都是弹性体,在管道发生泄漏时,流体受压力喷射诱发压力波并沿管壁内传播。检测管道某两处的压力波信号,利用互相关时延技术便可判定是否发生泄漏及泄漏的位置<sup>[2]</sup>。为了确定管道的最大腐蚀深度,P.H.Vieth等<sup>[3]</sup>采用概率统计方法,分析抽查检测数据,计算出管道表面有可能存在的最大蚀坑深度,这种实测加统计的方法能对现场检测数据进一步解释和分析,为腐蚀剩余强度评价和腐蚀剩余寿命预测提供较为可靠的依据。传统的统计分析方法用于管道缺陷的数据处理虽然精确度和可靠度不够高,但可用于前期的数据处理。

### 2.2 小波分析

经典的傅立叶信号分析方法是从频率的概念出发,分析信号能量在各个频率成分中的分布情况。由于傅立叶变换中的窗口形状是固定不变的,因而不能反映非平稳信号和一些突变信号的局部特征<sup>[4]</sup>。Marco等<sup>[5]</sup>认为压力信号的小波分析能探测到泄漏处的异常状态,在时频两域均具有良好局部特性的小波分析方法克服了 Fourier 变换在压力管道系统瞬态分析延时的缺点,并能收集到与泄漏相关的其他异常信号,但它也存在耗时多、花费较大,定位分析也较难。王海生等<sup>[6]</sup>在利用小波变换进行输油管线泄漏检测的基本原理基础上,结合现场试验的具体问题,实现了泄漏检测和定位算法。黄晶等<sup>[7]</sup>利用管道超声缺陷信号的小波分解与重构方法

对超声信号进行分析,提出一种基于小波变换的信噪分离算法,方便地识别出缺陷是否存在以及缺陷的位置,采用具有优良时频局部化能力的小波变换技术进行缺陷信号的增强,获得了较好的降噪效果。对结构进行损伤检测是一个运用数学模型建立物理系统的过程,对于遭受不同程度破坏的结构,其本身的某些特性往往发生变化。为了鉴定这些变化对结构的影响程度,Staszewski W J<sup>[8]</sup>, Womell G W<sup>[9]</sup>采用在管道结构损伤探测中进行小波变换信号处理的方法,可以对不同损伤引起的模态参数的改变进行计算并保存在数据库中,通过将实测模态参数的变化与存储在数据库中可能的损伤序列模态参数的变化进行损伤模式的比较和匹配,来识别管道损伤。Zhang Q<sup>[10]</sup>介绍了典型的 Mallat 快速变换算法,给出了这种信号处理技术在超声探测中的应用。Muhammad Afzal 等<sup>[11]</sup>以压力管道的焊接缺陷为研究对象,对缺陷回波信号作连续小波变换并利用 BP 神经网络进行训练和分类,能较好得出连续小波变换信号特征提取。Atherton DL 等<sup>[12]</sup>利用小波变换处理应力波信号,对自由端受冲击的含裂纹悬臂梁进行了时频分析,提取中高频信号的特征,探测出损伤是否存在并探测出了裂纹的位置,但未能探测出缺陷的类型和损伤程度。王潜龙等<sup>[13]</sup>在小波变换的基础上采用了小波包分解的方法,采用一组低通与高通共轭正交镜像滤波器组实现对低频信号与高频信号在通频范围内不同层次的分解序列,解决了用小波变换把原始信号分解为高频和低频后,对低频信号再分解时高频部分不能再细化的矛盾。对于那些无法直接判读反射波信息的测试信号的分析,孙国等<sup>[14]</sup>通过对应力波信号进行熵标准下的最优小波包分解和对一定节点分解系数对应信号成分加以重构,提取实测信号所包含的对应于缺陷部位的应力波反射特征信息,再现了反射波信号在时间轴上的规律性,消除了由实测信号直接读取存在的潜在错误。陈仁文等<sup>[15]</sup>利用输油管道在冲击激励下的信号波形和噪声的奇异性存在明显差别,使得其小波系数的模极大值和在不同的尺度下传播特性也不同,以及小波变换可以进行的多分辨率分析的特点,对信号小波变换在不同尺度下的小波系数的阈值处理,然后对信号进行重建,从而有效地去除了信号中的随机噪声。但在后续的研究中发现,信号中除了包含有高频随机干扰外,还存在隐态低频信号的干扰,小波分析应用效果还不够满意。如何利用

小波变换的多采样率分析技术或小波包分解技术更有效地实现管道检测尚有待于进一步研究。

### 2.3 自适应滤波处理

始于 20 世纪 60 年代的自适应滤波处理技术对复杂信号的处理具有独特的功能,它对处理参数依赖性较小,软、硬件实现均较简单,因此国内外对自适应滤波算法研究比较活跃。刘镇清等<sup>[16]</sup>通过系统输出反馈到自适应滤波器,由递推算法逐步修正滤波过程,使滤波器能够有效地跟踪信号的变化,使之在平稳情况下收敛于最佳估计值,对自适应累加器的权值进行在线修改,使系统输出的噪声功率最小,从而达到实时抑制噪声的作用。在稳态过程的缺陷检测中,用自适应滤波器能被快速、有效的检测出来异常数据,但进行缺陷检测<sup>[23]</sup>,存在计算速度慢,难以跟踪输入信号变化的缺点。于是,杨天奇<sup>[22]</sup>,Liu 等<sup>[23]</sup>,张鹏等<sup>[24]</sup>提出了用神经网络自适应滤波器来完成缺陷检测的方法,具有速度快的特点。如能用硬件完成,并调整好参数,检测时间极短( $2 \times 10^{-10}$  s),能很好地完成缺陷检测,大大提高自适应滤波器的时效性。Levie A U 等<sup>[17]</sup>将可观性理论拓展到 MIMO 非线性随机时变系统,在系统局部可观条件下用两个多层前馈神经网络 NN<sub>1</sub> 和 NN<sub>2</sub> 实现滤波器设计。该滤波器优于线性滤波器,能适应各种噪声环境。为了解决超声无损检测存在信噪比较低的问题,梁穗等<sup>[18]</sup>利用自适应信噪抵消过程中广泛应用的带延迟的有限冲击响应滤波器和 LMS 算法,超声检测信号经过自适应滤波器后,回波信号仍能由于其相关性相对较强而在输出中得到增强,而结构噪声则减弱,提高了缺陷回波信噪比。合适的卷积模型和解卷积方法是有效突出缺陷特征的关键,Yamani 等<sup>[19]</sup>提出了超声缺陷散射回波信号的卷积模型和缺陷散射回波信号的自适应滤波解卷积方法,经过解卷积得到的缺陷散射特征响应,具有一定抗噪能力,可进行实时处理,而且数据量比原始回波少,有利于随后的神经网络自动缺陷类型识别。同时,吴荔清等<sup>[20]</sup>利用自适应滤波技术对输油管道信号进行处理,实现管道中压力与流量信号的去噪,达到了很好的效果。将小波变换引入自适应滤波结构,N Erdol 等<sup>[21]</sup>提出了基于离散小波变换的自适应滤波方法,能对信号的时变特性和快速变化很好地重构,获得了越来越优越的滤波性能,并可期望具有更好的收敛性能。

### 2.4 支持向量机

· 40 ·

万方数据

由于输油管道周围介质的扩散,以及受管道的摩阻和外输泵运转特性等因素的影响,采样直接得到的压力、流量信号噪声较大。另外,由于人为敲击、挤压管道和外界振动等,也使采样信号出现偏离采样信号真值的伪信号。因此,为了准确地获得管道实际的压力和流量信号,应该剔除信号中所包含的粗大误差、累进性系统误差和周期性系统误差,以获得可靠的管内压力和流量信号<sup>[25]</sup>。郑杰等<sup>[26]</sup>提出了对输油管道泄漏检测信号的支持向量机方法,可有效地滤除粗大误差、累进性和周期性系统误差,为管道监测部分提供了可靠的数据,大大降低了系统的误报警率。

支持向量机(Support Vector Machine, 简称为 SVM)是基于统计学习理论和结构风险最小化原则的新型学习机器<sup>[27]</sup>。针对传统缺陷检测存在工序繁琐、准确率低、不易在线实施等,以及用人工神经网络对小样本事件进行数据处理存在的过学习、推广性差等问题,朱凌云等<sup>[28]</sup>从数据挖掘的角度,提出了直接从形成缺陷的影响因素着手,先消除工艺参数的冗余和噪声,再运用支持向量机分类算法,进行自动数据处理的新方法。

支持向量机模式识别方法的基本思想是将样本空间映射到特征空间,在特征空间求出原样本集的最优分类面,找出支持向量机来进行模式分类,其计算的复杂性却基本不增加<sup>[29,30]</sup>。采用 SVM 分类器,可充分发挥其对小样本数据处理的优势,得到最优分类面,所付出的代价最小,推广性好。与之不同的是,人工神经网络遵循经验风险最小的原则,追求在样本趋于无穷时的最优解<sup>[31]</sup>。不过,支持向量机数据处理技术目前只能对缺陷的有无作出初步的预测,因此对缺陷的大小、形状、分布等更为复杂情形的判定,Seungkoo Lee 等<sup>[32]</sup>提出了通过粗集对工艺参数进行知识约简,消除样本中的冗余信息,从而克服了 SVM 算法在大量样本数据处理时速度慢的缺点。虽然 SVM 应用于管道检测的研究还不够完善,但将 SVM 应用于缺陷检测无疑是智能型统计学习理论的革新和突破。

### 2.5 智能化数据处理方法

由于有关管道泄漏的未知因素很多,难以采用常规的数学模型,于是有研究者探索了基于人工神经网络检测管道泄漏的方法。唐秀家等<sup>[33]</sup>研究了管道泄漏后形成多相湍射流所引发的应力波在管壁中的传播机理,分析了泄漏引发的管道横振、纵振和

圆环振动,提出一系列应力波特征提取指标及其离散数据算法,建立对管道运行状况进行分类的神经网络模型以检测管道泄漏故障的发生,设计出了适于工业应用的管道缺陷检测仪器。由于基元与模式文法的复杂性,Stanker<sup>[34]</sup>提出了以管道系统泄漏后形成多相湍射流所引发的应力波信号时域和频域特征指标构造神经网络输入矩阵,建立对管道运行状况进行分类的神经网络模型以检测管道泄漏故障的发生,并提出以波峰、波谷、水平线、主导峰等模式基元抽取负压波形特征,采用上下文无关文法对管道负压波进行描述,进而建立了管道负压波形结构模式分类系统。K. Hwang 等<sup>[35]</sup>利用小波基函数的神经网络进行气体管道检测磁泄漏信号的分类,并应用多传感器、多层次小波基在泄漏管道不同位置拾取的泄漏信号的时频域特征,以所提取时频域特征指标来构造人工神经网络的输入矩阵,建立了能对管道泄漏进行分析检测定位的人工神经网络,实现了管道泄漏检测的模拟信号和实验磁泄漏信号二者预测管道缺陷的形状和大小。由于缺陷本身存在模糊性,陆俭伟等<sup>[36]</sup>研究了管材超声探伤中缺陷模糊模式识别的回波信号包络模型,模糊模式的特征参数选择原则和方法,建立了三种缺陷形状的标准模糊子集,并运用模糊模式识别方法对缺陷的实验数据进行了数值计算,获得了预想的结果。但如果能用模糊模式识别方法识别出管材缺陷的形状,同时将当量法判废标准的变化范围加以模糊控制,将使管材无损检测评价的实现更有可能。

### 2.6 数据融合技术

数据融合技术就是对来自多源的信息和数据进行检测、关联、相关、估计和综合等多方面的处理,得出被测对象和目标统一最佳估计<sup>[37]</sup>。人们相信单一方法不足以揭示被测件的全部特性,而大多数测量方法结合数据处理将得到更好的结果。“数据融合”于 1993 年首次引入无损检测,Mina 等<sup>[38]</sup>提出了在涡流检测中将图像分解成多带状,并在转换区内采用数据融合算法来实现图像融合。Bartels 等<sup>[39]</sup>采用信噪比最优方法来合并涡流信号,并用新的空间频率补偿方法使合并之前高频信号变得模糊而低频信号变得清晰。X. E. Gros<sup>[40]</sup>在他的专著《NDT Data Fusion》中对无损检测数据融合进行了系统和专门的论述,其中主要理论是 Bayesian 及 Dempster Shafer 概率论方法。通过对标准试样的测试,计算出优化信噪比的系数来融合不同频率的涡流图像,

但是参数的确定必须依靠标准试样来完成。Yim<sup>[41]</sup>提出了在频率域实现融合的方法;Dasarathy<sup>[42]</sup>等人则使用神经元网络实现数据的融合;Liu Z 等<sup>[43]</sup>利用多重分辨率的图像分解与重建,在变换域来实现融合。基于模糊神经网络的数据融合是一个新的领域,T. Fukuda 等<sup>[44]</sup>给出了一种适用于多传感器数据融合的模糊神经网络结构,基于模糊逻辑的无损检测数据融合系统,能够判别出缺陷的有无,通过隶属度函数和规则层的学习不断加以改进和调整,识别出缺陷类型的准确性较高。随着人工智能的发展,新的数据融合方法必将在油气管道缺陷检测的数据处理中获得广泛的应用。

### 3 存在的问题与研究方向

目前管道缺陷检测的数据处理尚存在如下主要问题:(1)要由检测所得的数据信息确定缺陷大小、形状和性质等特征参数仍然是一个待解决的难题。(2)数据处理系统的设计实施还存在动态测量误差模型的建立、系统优化、复杂动态环境下系统实时性、大型知识库的建立与管理等许多实际的问题,需与其它领域新技术的“嫁接与融合”,如人工智能、神经网络、遗传算法、进化计算、虚拟现实技术等。(3)管道缺陷检测的数据处理方法的理论研究不少,但实验技术条件还相对落后。(4)已有的多数融合研究皆是针对特定应用领域的特定问题开展的(混合结构,分布式),未形成完整的理论框架和融合模型,使得融合系统的设计具有一定的盲目性。

从目前的研究来看,管道缺陷检测数据处理方法的发展方向主要为:(1)信号分析技术。对损伤信号的处理,可采用多种信号分析方法,一方面可采用现有的信号分析手段,如谱分析、逆谱分析和统计分析方法;另一方面可采用更先进的信号分析工具,如逆散射理论、重构理论和同态分析等。近年来,小波变换和神经网络在损伤探测领域发挥了重要作用,全息谱分析方法全面考虑了相位变化的因素,对其进行研究将促进缺陷信号处理技术的快速发展。(2)研究和应用数据处理的数据库,高速并行检索和逻辑智能推理。利用大型空间数据库中数据和知识进行推理是系统过程中的关键任务,但其数据量往往非常庞大,这就有必要深入研究和探讨用于空间数据库的知识发现机制和方法。已有许多学者致力于此领域的研究,提供了多种数据挖掘方法,如基于泛化的空间数据挖掘方法、空间数据聚类。(3)多种

方法的融合。已发展的管道缺陷检测的数据处理方法在不同的探测环境中显示出各自的优越性,但还没有发现哪一种方法具有普适性,故仍需改进融合算法以提高融合系统的性能。目前,模糊逻辑、神经网络、进化计算、粗集理论、支持向量机、小波变换等技术的结合是重要发展趋势。利用集成的智能方法(如模糊逻辑+神经网络、模糊逻辑+进化计算、神经网络+进化计算、小波变换+神经网络等)提高数据融合的性能,是值得进一步深入研究的课题。

#### 4 结语

数据处理不仅是油气管道无损检测的一种辅助技术,而且已发展成为一种基本技术。油气输送管道在服役过程中往往因腐蚀、机械损伤等多种原因产生不同的缺陷,这些缺陷的存在及其发展将会降低管道运行的安全性。由检测信息结合数据处理来得到所需的管道缺陷参数,提出合理的维护和维修的建设方案,从而提高含缺陷管道运行的可靠性。管道缺陷检测数据的处理应本着管道安全运行评定的原则,对各种缺陷,特别是可能影响管道安全运行的邻近缺陷进行综合分析,以提高检测的精度和有效性。如何提高数据处理的效率及其安全可靠性是管道缺陷检测技术开发或研究者十分关注的问题,管道缺陷检测的数据处理方法将是管道缺陷检测发展的主要研究方向之一。

#### 参考文献:

- [1] Gregory Piatetsky - Shapiro, Ronald J. Brachman, Tom Khabaza, et al. An Overview of Issues in Developing Industrial Data Mining and Knowledge Discovery Applications. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD - 96) [C]. Portland, Oregon AAAI press, 1996, August: 89 - 95.
- [2] 王福明, 胡志新. 相关分析在油气输送管道检漏中的应用[J]. 油气田地面工程, 1998, 17(5): 13 - 14, 20.
- [3] P. H. Vieth, S. W. Rust and E. R. Statistical Analysis Methods for ILI Metal - loss data [J]. Johnson Corrosion Prevention and Control, 1998, 45(1): 20 - 30.
- [4] Mallat SG. Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation [J]. IEEE Trans Pattern And Machine Intelligence. 1989, 11(7): 74 - 93.
- [5] Marco Ferrante, Bruno Brunone. Pipe System Diagnosis and Leak Inspection by Unsteady - State Tests. 2. Wavelet Analysis [J]. Advances in Water Resources, 2003(26): 107 - 116.
- [6] 王海生, 叶昊, 王桂增. 基于小波分析的输油管道泄漏检测[J]. 信息与控制, 2002, 31(5): 456 - 460.
- [7] 黄晶, 厥沛文. 小波分析在管道缺陷超声检测中的应用[J]. 传感技术学报, 2003, 3: 263 - 266.
- [8] Staszewski W J. Structural and Mechanical Damage Inspection Using Wavelets [J]. The Shock and Vibration Digest, Sage Publications inc, 1998, 30(6): 457 - 472.
- [9] Womell U W. Signal Processing with Fractals, A Wavelet - Based Approach [M]. Uper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 1996: 2 - 23.
- [10] Zhang Q, Benveniste A. Wavelet Networks [J]. IEEE Trans Neural Networks 1992, 3(6): 89 - 98.
- [11] Muhammad Afzal, Satish Udpa. Advanced Signal Processing of Magnetic Flux Leakage Data Obtained from Seamless Gas Pipeline [J]. NDT&E International, 2002, 35(7): 449 - 457.
- [12] Atherton DL, Welbourn C. A rotating - drum Rig for Testing Pipeline Anomaly Detectors under Simulated Pressure [J]. Materials Evaluation, 1988, 46(1): 10 - 17.
- [13] 王潜龙, 冯全科, 屈展. 等. 基于声发射与小波包理论的压力管道泄漏检测[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 515 - 518.
- [14] 孙国, 李桂华, 顾元宪. 基于小波包分解的应力波无损检测分析方法[J]. 振动工程学报 2002, 15(4): 488 - 491.
- [15] 陈仁文, 周洪梅, 余旭峰. 输油管道应力波检测中的小波去噪方法研究[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 82 - 85.
- [16] 刘镇清, 项延训. 自适应滤波在超声无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2001, 23(9): 399 - 401, 410.
- [17] Levie A U, Narendra K S. Control of Nonlinear Nautical Systems Using Neural Networks - Part II: Observability, Identification, and Control [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1996, 7(1): 30 - 42.
- [18] 梁穗, 刘镇清, 陆明达等. 超声检测信号的自适应滤波[J]. 无损检测, 1998, 20(3): 69 - 70, 85.
- [19] Ahmed Yamani. High - order Spectra - based Deconvolution of Ultrasonic NDT Signals for Defect Identification [J]. Ultrasonics, 1997, 35(7): 525 - 531.
- [20] 吴荔清, 郑杰, 刘润华等. 输油管道泄漏检测信号的自适应滤波处理[J]. 遥测遥控, 2001, 4: 23 - 28.
- [21] N Erdol, F Basbug. Wavelet Transform Based Adaptive Filtering. In: Signal Processing - VI: Theories and Applications [J]. The Netherlands: Elsevier Science, 1992: 1117 - 1120.
- [22] 杨天奇. 基于神经网络自适应滤波器的故障检测与诊断[J]. 数据采集与处理, 2000, 15(1): 128 - 131.

- [23] Liu Z Q, et al. Structure Noise Reduction of Ultrasonic Signals Using Artificial Neural Network Adaptive Filtering[J]. Ultrasonics, 1997, 35(4): 325 - 328.
- [24] 张鹏, 王金城. 自适应滤波算法的神经网络实现[J]. 计算技术与自动化, 2003, 21(1): 21 - 23.
- [25] Muhammad Afzal, Satish Udpa. Advanced Signal Processing of Magnetic Flux Leakage Data Obtained from Seamless Gas Pipeline[J]. NDT&E International. 2002, 35(7): 449 - 457.
- [26] 郑杰, 吴荔清, 刘润华等. 输油管道泄漏检测信号的统计处理方法[J]. 石油大学学报, 2001, 25(3): 84 - 86.
- [27] Cortis C, Vapnik V. Support Vector Networks[J]. Machine Learning. 1995, 20: 273 - 297.
- [28] 朱凌云, 曹长修. 基于支持向量机的数据处理方法[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(6): 42 - 45.
- [29] VAPNIK V. An Overview of Statistical Learning Theory[J]. IEEE Transaction on Neural Networks. 1999, 10(5): 988 - 999.
- [30] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 32 - 42.
- [31] Scholkopf B, Sung K - K, Burges C et al. Comparing Support Vector Machines with Gaussian Kernels to Radial Basis Function Classifiers. IEEE Trans. on Signal Processing, 1997, 45(11): 2758 - 2765.
- [32] Seungkoo Lee, George Vachtsevanos. An Application of Rough Set Theory to Defect Detection of Automotive glass[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 60(3 - 5): 225 - 231.
- [33] 唐秀家, 颜大椿. 基于神经网络的管道泄漏检测方法及其仪器[J]. 北京大学学报, 1997, 33(3): 319 - 327.
- [34] Stanker, Rosenfeld. Hierarchical Representation of Waveform[J]. IEEE Trans on PAMI, 1998(1): 73 - 82.
- [35] K. Hwang, S. Mandayam, S.S. Udpa, et al. Characterization of Gas Pipeline Inspection Signals Using Wavelet Basis Function Neural Networks[J]. NDT&E Intern Ational, 2000, 33(8): 531 - 545.
- [36] 陆俭伟, 吕干霖, 黎宗潼等. 管材超声探伤中缺陷模糊模式识别方法研究[J]. 声学学报, 1996, 21(1): 20 - 28.
- [37] Liu Z, Tsukada K, Hanasaki K. One - dimensional Eddy Current Multi - Frequency Data Fusion: a Multi - resolution Analysis Approach[J]. INSIGHT, 1998, 40(4): 286 - 289.
- [38] Mina M, Udpa SS, Udpa I, et al. A New Approach for Practical Two Dimensional Data Fusion Utilizing a Single Eddy Current probe[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 749 - 754.
- [39] Bartels KA, Fisher JL. Optimal Multidimensional Multi - frequency Eddy Current Mixing Techniques[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1996, 15: 393 - 400.
- [40] X. E. Gros. Review of NDT Data Fusion Processes and Applications[J]. Non - Destructive Testing and Condition Monitoring, 1997, 39(9): 652 - 657.
- [41] Yim J, Udpa S S, Udpa L, Lord W and Sun K. Two Dimensional Multi - frequency Eddy Current Data Fusion. Review of Progress in QNDE[J], 1996, (15): 2125 - 2132.
- [42] Dasarathy B V. Sensor Fusion 1998: A Case for Intelligent Fusion[J]. Optical Engineering, 1998, 37(2): 352 - 353.
- [43] Liu Z, Tsukada K, Hanasaki K, Kurisu M. Two - Dimensional Eddy Current Signal Enhancement via Multifrequency Data Fusion[J]. Research in NDE, 1999, 11(3): 165 - 177.
- [44] T. Fukuda. Multisensor Integration System Based on Fuzzy Inference and Neural Network[J]. Information Sciences, 1998, 71(1): 27 - 41.

收稿日期: 2005 - 05 - 16 修稿日期: 2005 - 05 - 28

作者简介: 郑贤斌(1978 - ), 男, 博士, 主要从事油气管道安全运行保障技术研究, 通讯地址: 中国石油大学机电工程学院。

(上接第 9 页) 焊缝外观平滑、整洁、无不规则的外形; 焊缝金属的余高在 0.3 ~ 0.5 mm 为佳, 焊缝管内焊瘤高度应小于 0.5 mm(见表 4)。焊缝应无任何焊接缺陷, 如气孔、夹渣、氧化、裂纹等; 第二道焊缝应全覆盖第一道焊道。

对钛、锆等有色金属应检查焊道及热影响区的颜色, 银白色、浅黄色为合格。蓝色、灰色为不合格。

## (2) 表面检验

外观检验合格后, 试样应进行 MT(碳钢)、PT(不锈钢及其它有色金属)。(待续)

收稿日期: 2005 - 07 - 12

作者简介: 董家祥(1949 - ), 1979 年毕业于沈阳机电学院焊接专业, 毕业后一直从事焊接试验研究、工艺评定、容器制造、海洋石油开采、炼化、石油化工等国际大型项目的施工建设。

作者: 郑贤斌, 陈国明, 袁超红, ZHENG Xian-bin, CHEN Guo-ming, YUAN Chao-hong  
作者单位: 中国石油大学, 机电工程学院, 山东, 东营, 257061  
刊名: 压力容器 **ISTIC PKU**  
英文刊名: PRESSURE VESSEL TECHNOLOGY  
年, 卷(期): 2005, 22(10)  
被引用次数: 8次

## 参考文献(44条)

1. Staszewski W J [Structural and Mechanical Damage Inspection Using Wavelets](#)[外文期刊] 1998(06)
2. 黄晶; 厥沛文 [小波分析在管道缺陷超声检测中的应用](#)[期刊论文]-[传感技术学报](#) 2003(3)
3. Womell U W [Signal Processing with Fractals, A WaveletBased Approach](#) 1996
4. Seungkoo Lee; George Vachtsevanos [An Application of Rough Set Theory to Defect Detection of Automotive glass](#)[外文期刊] 2002(3-5)
5. Scholkopf B; Sung K- K; Burges C [Comparing Support Vector Machines with Gaussian Kernels to Radial Basis Function Classifiers](#)[外文期刊] 1997(11)
6. Levie A U; Narendra K S [Control of Nonlinear Dynamical Systems Using Neural Networks- Part II: Observability, Identification, and Control](#)[外文期刊] 1996(01)
7. 刘镇清; 项延训 [自适应滤波在超声无损检测中的应用](#)[期刊论文]-[无损检测](#) 2001(09)
8. 陈仁文; 周洪梅; 余旭峰 [输油管道应力波检测中的小波去噪方法研究](#)[期刊论文]-[振动与冲击](#) 2003(04)
9. 王海生; 叶昊; 王桂增 [基于小波分析的输油管道泄漏检测](#)[期刊论文]-[信息与控制](#) 2002(05)
10. Marco Ferrante; Bruno Brunone [Pipe System Diagnosis and Leak Inspection by Unsteady - State Tests. 2. Wavelet Analysis](#)[外文期刊] 2003(26)
11. T Fukuda [Multisensor Integration System Based on Fuzzy Inference and Neural Network](#) 1998(01)
12. Liu Z; Tsukada K; Hanasaki K; Knrisu M [Two- Dimensional Eddy Current Signal Enhancement via Multifrequency Data Fusion](#) 1999(03)
13. Dasarathy B V [Sensor Fusion 1998: A Case for Intelligent Fusion](#)[外文期刊] 1998(02)
14. Yim J; Udpa S S; Udpa L; Lord W, Sun K [Two Dimensional Multi - frequency Eddy Current Data Fusion](#) 1996(15)
15. X E Gros [Review of NDT Data Fusion Processes and Applications](#) 1997(09)
16. Mallat SG [Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation](#) 1989(07)
17. Bartels KA; Fisher JL [Optimal Multidimensional Multifrequency Eddy Current Mixing Techniques](#) 1996
18. Mina M; Udpa SS; Udpa I A [A New Approach for Practical Two Dimensional Data Fusion Utilizing a Single Eddy Current probe](#) 1997
19. Liu Z; Tsukada K; Hanasaki K [One- dimensional Eddy Current Multifrequency Data Fusion: a Multi-resolution Analysis Approach](#) 1998(04)
20. 陆俭伟; 吕干霖; 黎宗潼 [管材超声探伤中缺陷模糊模式识别方法研究](#) 1996(01)
21. K Hwang; S Mandayam; S S Udpa [Characterization of Gas Pipeline Inspection Signals Using Wavelet Basis Function Neural Networks](#)[外文期刊] 2000(08)
22. Stanker Rosenfeld [Hierarchical Representation of Waveform](#) 1998(01)

23. [唐秀家;颜大椿 基于神经网络的管道泄漏检测方法及仪器](#)[期刊论文]-[北京大学学报\(自然科学版\)](#) 1997(03)
24. [张学工 关于统计学习理论与支持向量机](#)[期刊论文]-[自动化学报](#) 2000(01)
25. [P H Vieth;S W Rust;E R Statistical Analysis Methods for ILI Metal - loss data](#) 1998(01)
26. [VAPNIK V An Overview of Statistical Learning Theory](#)[外文期刊] 1999(05)
27. [朱凌云;曹长修 基于支持向量机的数据处理方法](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 2002(06)
28. [Corts C;Vapnik V Support Vector Networks](#) 1995
29. [郑杰;吴荔清;刘润华 输油管道泄漏检测信号的统计处理方法](#)[期刊论文]-[石油大学学报\(自然科学版\)](#) 2001(03)
30. [Muhammad Afzal;Satish Udpa Advanced Signal Processing of Magnetic Flux Leakage Data Obtained from Seamless Gas Pipeline](#)[外文期刊] 2002(07)
31. [张鹏;王金城 自适应滤波算法的神经网络实现](#)[期刊论文]-[计算技术与自动化](#) 2003(01)
32. [Liu Z Q Structure Noise Reduction of Ultrasonic Signals Using Artificial Neural Network Adaptive Filtering](#)[外文期刊] 1997(04)
33. [杨天奇 基于神经网络自适应滤波器的故障检测与诊断](#)[期刊论文]-[数据采集与处理](#) 2000(01)
34. [N Erdol;F Basbug Wavelet Transform Based Adaptive Filtering](#) 1992
35. [吴荔清;郑杰;刘润华 输油管道泄漏检测信号的自适应滤波处理](#)[期刊论文]-[遥测遥控](#) 2001(04)
36. [王福明;胡志新 相关分析在油气输送管道检漏中的应用](#)[期刊论文]-[油气田地面工程](#) 1998(05)
37. [Ahmed Yamani High - order Spectra- based Deconvolution of Ultrasonic NDT Signals for Defect Identification](#)[外文期刊] 1997(07)
38. [梁穗;刘镇清;陆明达 超声检测信号的自适应滤波](#) 1998(03)
39. [孙国;李桂华;顾元宪 基于小波包分解的应力波无损检测分析方法](#)[期刊论文]-[振动工程学报](#) 2002(04)
40. [王潜龙;冯全科;屈展 基于声发射与小波包理论的压力管道泄漏检测](#)[期刊论文]-[西安交通大学学报](#) 2003(05)
41. [Atherton DL;Welbourn C A rotating- drum Rig for Testing Pipeline Anomaly Detectors under Simulated Pressure](#) 1988(01)
42. [Muhammad Afzal;Satish Udpa Advanced Signal Processing of Magnetic Flux Leakage Data Obtained from Seamless Gas Pipeline](#)[外文期刊] 2002(07)
43. [Zhang Q;Benveniste A Wavelet Networks](#)[外文期刊] 1992(06)
44. [Gregory Piatetsky- Shapiro;Ronald J Brachman;Tom Khabaza An Overview of Issues in Developing Industrial Data Mining and Knowledge Discovery Applications](#) 1996

#### 本文读者也读过(8条)

1. [王延年. 朱强. 赵则祥. Wang Yannian. Zhu Qiang. Zhao Zexiang 长输油气管道泄漏检测方法研究进展](#)[期刊论文]-[石油机械](#)2007, 35(5)
2. [王维斌 油气管道的在线检测与直接评估技术](#)[期刊论文]-[石油工业技术监督](#)2005, 21(5)
3. [徐文华. 梁政. 何茂林. 吕治忠. 钟功祥. 李萍 管道位置检测技术方案研究](#)[期刊论文]-[西南石油学院学报](#) 2006, 28(5)
4. [于培林. 姚安林. 刘晓艳. 刘艳华. YU Pei-lin. YAO An-lin. LIU Xiao-yan. LIU Yan-hua 油气管道外检测技术的综合应用](#)[期刊论文]-[全面腐蚀控制](#)2008, 22(2)
5. [蒋奇. 王太勇 油气管道腐蚀检测技术的研究](#)[期刊论文]-[石油化工自动化](#)2002(5)
6. [孙友义. 陈国明. 畅元江. Sun Youyi. Chen Guoming. Chang Yuanjiang 下放或回收作业状态下超深水钻井隔水管](#)



[轴向动力分析](#) [期刊论文]-[中国海上油气](#)2009, 21 (2)

7. [武晓滕](#), [高炜欣](#), [袁磊](#), [刘畅](#) [SVMs在油气管道焊缝缺陷检测中的应用](#) [期刊论文]-[西安石油大学学报 \(自然科学版\)](#) 2011, 26 (6)
8. [武涛](#), [李长久](#) [热辐射检测系统测量热喷涂粒子参数时的数据处理](#) [期刊论文]-[西安交通大学学报](#)2005, 39 (1)

#### 引证文献(8条)

1. [赵忠刚](#), [张卿蕊](#), [冯斌](#), [曹晓燕](#) [油气管道机械损伤的完整性研究进展](#) [期刊论文]-[油气储运](#) 2012 (4)
2. [宋志强](#), [李著信](#), [张镇](#), [姜玉泉](#) [基于连续小波变换的输油管道裂纹缺陷漏磁检测研究](#) [期刊论文]-[化工自动化及仪表](#) 2010 (7)
3. [马强](#) [长输管道外防腐层的检测与评价](#) [期刊论文]-[承德石油高等专科学校学报](#) 2009 (3)
4. [戴波](#), [赵晶](#), [周炎](#) [基于支持向量机的管道腐蚀超声波内检测](#) [期刊论文]-[化工学报](#) 2008 (7)
5. [戴波](#), [张慧平](#), [唐建](#) [分裂基算法在管道腐蚀超声内检测中的应用](#) [期刊论文]-[计算机与应用化学](#) 2007 (4)
6. [戴波](#), [张慧平](#), [唐建](#) [分裂基算法在管道腐蚀超声内检测中的应用](#) [期刊论文]-[计算机与应用化学](#) 2007 (4)
7. [郑伟](#), [帅健](#) [埋地管道外防腐蚀体系的检测与评价](#) [期刊论文]-[石油化工腐蚀与防护](#) 2007 (6)
8. [初琦](#) [数字化X射线焊缝底片扫描图像校正研究](#) [学位论文] 硕士 2006

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_ylrq200510010.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ylrq200510010.aspx)