

储罐声发射检测信号的聚类分析

沈书乾, 李海三

(广东省特种设备检测研究院茂名检测院, 茂名 525000)

摘要: 聚类分析作为一种先进的无监督模式识别技术, 能在无先验知识的情况下对数据进行分类并揭示数据内部结构。通过优化 K 均值聚类算法, 并应用浮动阈值重新计算声发射检测波形数据的常用特征参量作为聚类算法的输入向量, 采用浮动阈值计算得到的特征向量更能反映声发射波形特征, 取得良好的聚类效果。通过现场储罐声发射检测数据实例的聚类分析, 结果表明 K 均值聚类能有效地区别不同声源和传播途径的声发射信号, 具有很好的去噪效果, 能有效提高罐底声发射检测评价准确度。

关键词: K 均值聚类; 储罐底板; 声发射检测; 模式识别

中图分类号: TG115.28, TB52

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2014)09-0054-05

Cluster Analysis of Signals of Storage Tank Acoustic Emission Testing

SHEN Shu-qian, LI Hai-san

(Maoming Institute of Detection, Guangdong Academy of Special Equipment
Detection and Research, Maoming 525000, China)

Abstract: Cluster analysis is an advanced unsupervised pattern recognition technology, which can classify data and reveal the data internal structure without prior knowledge. In this paper, the application of floating threshold value to calculate the characteristic parameters of acoustic emission test common waveform data is used as input vector clustering algorithm by optimizing K means clustering calculation. The featuring vector by floating threshold calculation has more acoustic emission waveform characters, obtaining good clustering effect. By analysis of acoustic emission test data of storage tank, the results show that K means clustering can determine different sound signals from different sound sources and propagation paths, affording excellent de-noise effect and effectively improving acoustic emission test accuracy of tank bottom.

Keywords: K means clustering; Storage tank bottom; Acoustic emission testing; Pattern recognition

随着世界经济的高速发展和能源需求的不断增加, 原油和成品油的储备显得尤为重要, 大型储罐是石化行业中的重要设备, 一旦发生事故极易引起火灾和爆炸, 并造成严重的环境污染。因此, 企业需要科学合理安排储罐的检测和修复计划^[1]。

与传统的储罐底板腐蚀检测方法(如漏磁、超声、涡流等)相比, 声发射检测是一种在线、高效和经济的检测方法, 它克服了传统技术需要停工置

换、清理罐底、逐点扫描检查造成的费时、费力, 总体检测费用高的缺点^[2]。

声发射^[3]能够区分不同类型的损伤模式, 但是问题在于如何通过声发射信号数据的分析将不同声发射源信号区分开来。而现场储罐声发射检测时工况复杂, 噪声来源多, 使得数据分析更加困难, 去噪同时也成为现场数据处理迫在眉睫的难题。在检测过程中仅靠对所采集到的特征参数直接分析往往是不够的, 必须借助于现代计算机及先进的信号处理技术(例如模式识别^[4]、频谱分析、小波变换及人工神经网络等)来对其进行分析。聚类分析作为一种先进的无监督模式识别技术, 能在无先验

收稿日期: 2013-09-16

作者简介: 沈书乾(1979—), 男, 工程师, 主要从事承压类特种设备先进检测方法的研究工作。

知识的情况下对数据进行分类并揭示数据内部结构。通过系统的分析,寻找合理的聚类分析方法,能有效提高储罐声发射检测数据分析水平。

1 聚类分析

声发射信号可视为 d 维(多维向量的标识)的特征向量(幅度,持续时间,上升时间,计数,能量等)。由于分析过程中没有任何数据进行过标记,需要应用无监督模式分析的方法(聚类分析)对声发射信号进行模式分析。典型的聚类分析^[5]步骤如下:

- (1) 特征向量的描述(特征提取)。
- (2) 数据间亲密程度的描述(距离)。
- (3) 聚类分析(将具有相似模式的数据归为一类)。
- (4) 聚类有效性的分析(使用特殊的优化准则)。
- (5) 标记聚类结果(识别声发射源)。

1.1 相似性度量:欧式距离

欧氏距离是聚类分析中使用最广泛的距离,表达式如下:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{t=1}^m |d_{it} - d_{jt}|^2} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: d_{ij} 为 i 点和 j 点之间的距离; d_{it} 为 i 点与参考点 t 的距离; d_{jt} 为 j 点与参考点 t 的距离。

由于该距离与各变量的量纲有关,在不考虑指标间的相关性及各变量方差不同的条件下,变差大的变量在欧氏距离中的作用会更大,因此采用归一化对各变量进行处理。

1.2 K 均值聚类

K 均值聚类^[6] (K -means clustering) 是 Mac Queen 提出的一种无监督实时聚类算法,在最小化误差函数的基础上将数据划分为预定的 K 类。该算法原理简单并便于处理大量数据,在信号处理中得到广泛应用。但是该算法对初始聚类中心依赖性比较大,随机选取初始聚类中心的缺点是如果使得初始聚类中心得到的分类严重偏离全局最优分类,这样算法可能会陷入局部最优值。为了解决这个问题,采用随机均匀分布初始化聚类中心代替简单的随机指派,设定最大聚类次数,每次聚类采用不同的随机中心,最后只有最好的一组聚类结果被保存下来。

K 均值聚类算法的步骤如下:

- (1) 初始化。输入声发射信号特征表达矩阵作为对象集 X ,输入指定聚类类数 K ,并在 X 中随机

选取 K 个对象作为初始聚类中心。设定最大循环次数为迭代中止条件。

(2) 进行迭代。根据相似度准则将数据对象分配到最接近的聚类中心,从而形成一类。初始化隶属度矩阵。

(3) 更新聚类中心。然后以每一类的平均向量作为新的聚类中心,重新分配数据对象。

(4) 重复执行第二步和第三步直至满足中止条件。

1.3 聚类有效性:DB 准则

最佳的聚类个数 K 将由 Davies-Bouldin 准则决定。Davies-Bouldin 系数定义如下:

$$DB = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left\{ \frac{\bar{d}_i + \bar{d}_j}{D_{ij}} \right\} \quad (2)$$

式中: $\bar{d}_i, \bar{d}_j$ 分别为 i 类和 j 类的类内平均距离; D_{ij} 为 i 类和 j 类的类间距离。

DB 达到最小值时聚类结果最佳。因此 K 将从 2 到 10 取值,选择 DB 达到最小值时的 K 值。

2 储罐声发射检测

2.1 检测实例

5 000 m³ 拱顶罐,材料为 A3F,直径为 23 700 mm,高度为 12 530 mm,底板厚度为 16 mm,介质为重柴,生产日期为 1999 年 2 月,投入使用日期为 1999 年 10 月。

2.2 数据采集系统

仪器: PAC SAMOS-32。

探头: DP3I 30-60 kHz 真空脂耦合剂。

2.3 检测过程

按检测方案及传感器布点,在该储罐外壁相应位置处打磨出 $\phi 30$ mm 可见金属光泽的区域,作为安装传感器的位置。传感器沿圆周方向均匀排布。各通道连接完成后,设置采集程序,对各通道进行灵敏度标定,使各通道灵敏度与平均灵敏度之差小于 3 dB。

3 数据分析

3.1 声发射信号的特征提取

声发射波形是非常复杂的高维数据,现有的数据处理技术都不能直接对波形数据进行分类。因此在应用聚类分析前首先需要定义一组合理有效的声发射信号特征参量。选取幅度、持续时间、上升时间、计数、能量和峰值频率等 5 个参量作为声发射波形的特征参量。其中,除了幅度是采集系统实时测量之外,其它参数都是通过对波形进行处理后计算得到的,因为它们依赖基于幅度阈值确定的声

发射波到达时间和结束时间。声发射信号的特征取决于声发射源和传感器的特性,而由 PAC 系统提供的参数不管声发射信号的特性均采用固定幅度阈值,这将使得具有相同特性的声发射信号由于衰减等原因呈现不同的特征参量。采用浮动的阈值重新计算信号的特征参数,浮动阈值取为波形信号最大电压值的 30%。

结合储罐声发射检测数据的特点,最后选择幅度、计数、能量和峰值频率作为聚类分析的输入特征向量。

3.2 最佳聚类个数的确定

根据 Davies-Bouldin 准则, K 取 5 时聚类效果最佳,如图 1 所示。

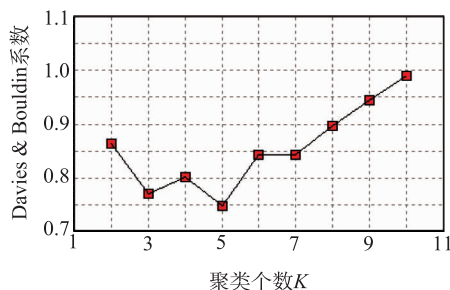


图 1 Davies-Bouldin 准则: $K=5$ 时 DB 系数最小

3.3 声发射信号聚类分析

$K=5$ 时 AE 聚类信号各个特征参数的均值如表 1 所示。

通过观察持续时间对计数聚类图(图 2)和幅度

表 1 聚类特征参数均值

类别	计数/次	能量	幅度/dB	峰值频率/kHz	撞击个数/次
1	39	29	39	77	231
2	1	27	40	0.310 8	1 644
3	24	28	37	30	3 251
4	13	84	48	30	789
5	13	27	36	11	5 382

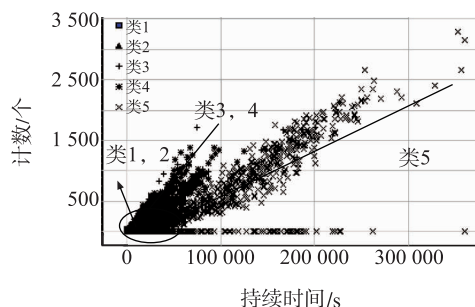


图 2 持续时间对计数聚类图

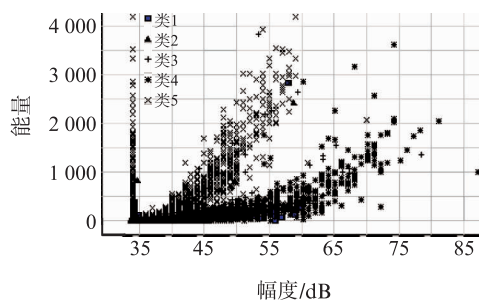


图 3 幅度对能量聚类图

对能量聚类图(图 3),有两条趋势明显不同的分支,在持续时间对计数聚类图中直线斜率代表了信号的频率,频率小的分支被单独分为一类,标记为“类 5”,图 4 为类 5 信号持续时间对计数聚类图。结合表 1 类 5 信号波形(图 5)可知类 5 平均频率,幅度和能量都很低,表现为低频的噪声信号,多为摩擦、磨损造成。

观察时间对撞击累计图(图 6)在检测时间达到 2 200 s 时类 2 撞击数突然增加,并呈直线上升至检测结束。表 1 数据表明类 2 信号的计数为 1,频率 0.31 kHz,并集中分布在图 2 的圆圈里。图 8 为类 2 信号持续时间对计数聚类图,波形如图 9 所示,综上所述表明为电磁噪声。

现将类 5 和类 2 信号从数据文件中滤除,重新对数据文件进行定位计算得到新的定位图(图 10(b),11(b)所示)。同原始数据二维三维定位图(图 10(a),

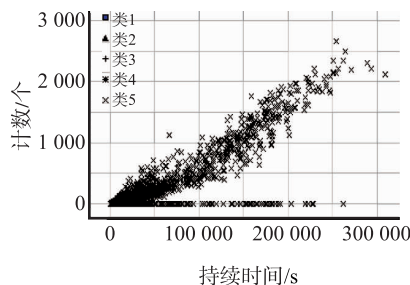


图 4 持续时间对计数聚类图(类 5)

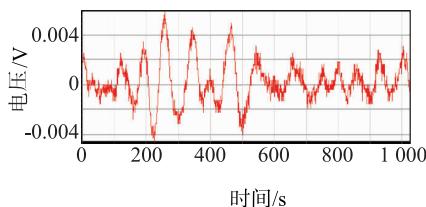


图 5 类 5 波形图

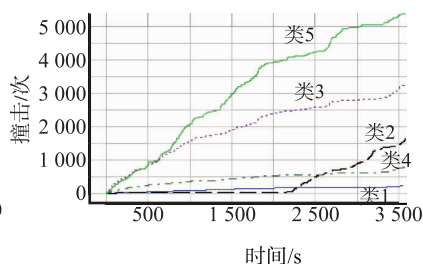


图 6 时间对撞击累计图

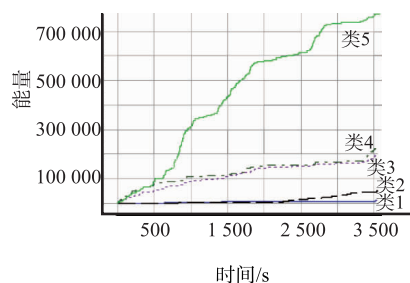


图7 时间对能量聚类图

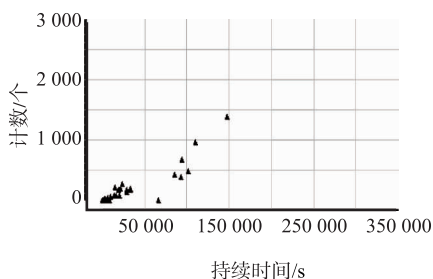


图8 持续时间对计数聚类图(类2)

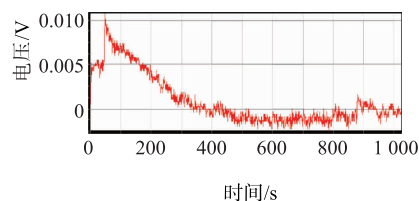
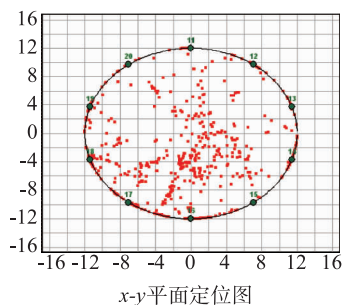
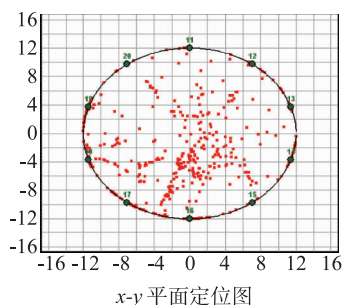


图9 类2波形图

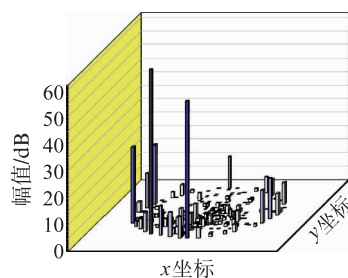


(a) x-y平面定位图

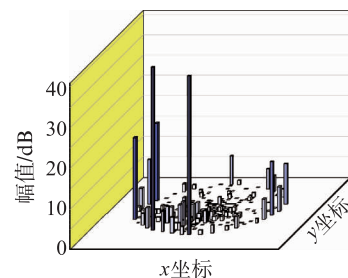


(b) x-y平面定位图

图10 储罐声发射信号二维定位图



(a) x-y-Events 三维定位图



(b) x-y-Events 三维定位图

图11 储罐声发射信号三维定位图

11(a)所示)相比,新定位数略微有所下降但定位分布基本不变。根据表1进行数据统计:原数据文件11 279个撞击信号,过滤类2和类5信号后剩余4 272个撞击信号,即过滤掉62.1%的信号数据而定位事件基本没有减少,这说明类2和类5这种由于摩擦、磨损或电磁噪声所产生的干扰信号基本不产生定位,而且通过聚类分析能快速而有效地将它们分类,并且从数据文件中分离。

类1信号占滤后总信号量的5.41%,其在幅度对能量聚类图上的分布规律与类2很相似,但是类1的峰值频率是5类中最高的,最高频率达到172 kHz,所以类1信号很有可能是直接通过储罐内壁或底板传播的。

类3信号占滤后信号总量的76.1%,从图12中可以看出,类3信号主要分布在35~45 dB。类4

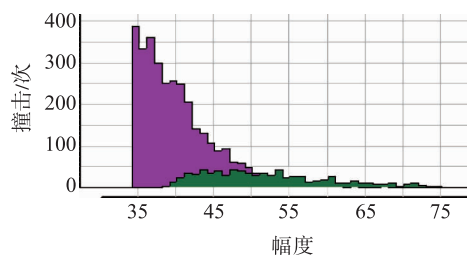


图12 幅度对撞击图(类3和类4)

信号占滤后总信号总量的18.5%,主要分布在40~75 dB之间。类3和类4信号虽然在幅度分布上有所区别,但是在波形上相似,且平均频率均在30 kHz,因此可以认为这两类信号为储罐内通过介质传播或储罐底板混合传播的罐底腐蚀或开裂信号,同时也是产生定位事件的主要信号来源。

利用声发射技术对5 000 m³拱顶罐进行了在线条件下储罐底板腐蚀状态监测。通过对7.23 m

液位下所采集到的声发射数据进行实时和事后处理分析,根据常压金属储罐声发射检测及评价方法(JB/T 10764—2007),得出如下结论:

(1) 罐底声发射信号区域分析等级为Ⅲ级。

(2) 罐底声发射信号时差定位结果表明,储罐底板定位点多。

综合(1)和(2)的分析结果认为,该储罐底板存在中等腐蚀,声发射检测评价结果为Ⅲ级。建议3年内开罐检查,或再次进行声发射在线检测。

4 结论

通过对现场储罐声发射检测数据的聚类分析,结合储罐底板定位事件分析得到以下结论:

(1) 现场储罐声发射检测过程中不可避免带有大量现场噪声信号,聚类分析能有效地将摩擦、磨损和电磁干扰等产生的噪声信号区分开来,而且这些噪声信号不能产生定位。应用聚类分析去噪后,再根据常压金属储罐声发射检测及评价方法(JB/T 10764—2007)对储罐腐蚀情况进行评价,结果更加合理,科学。

(2) 聚类分析能识别储罐内沿不同途径传播的底板腐蚀声发射信号,其中高频部分为底板或内壁传播,低频部分为介质或底板介质混合传播。

聚类分析技术能在无先验知识的情况下揭示数据内部本质结构,这使得分析过程由先分析声发射源信号特征后分类变成先分类然后分析单个具有相似特性的一类声发射信号,最后定性定量。

(上接第48页)

综合以上的分析可以看出:声发射技术可以用来分析焊接夹渣试件的受载变形过程,这对利用声发射技术分析试件的缺陷类型奠定了基础。

表6 不同阶段的频域特征指标分布统计表

声发射源	局域谱1 (100~ 200 kHz) /%	局域谱2 (200~ 270 kHz) /%	局域谱3 (270~ 400 kHz) /%	频率 质心/ kHz	平均 频率/ kHz	峰值 频率/ kHz
标准试件 塑性变形	25~70	20~60	20~40	140~210	20~120	90~180
裂纹稳态 扩展	0~50	0~76	60~100	190~290	100~280	96~178, 228~375
裂纹非 稳态扩展	0~50	0~100	60~100	140~280	14~230	90~185, 280~375
裂纹断裂 阶段	5~93	1~98	0~48	140~240	88~182	92~180, 290~312

即,由聚类后各类的数据特征来推断不同声发射源特征,最后找到描述各声发射源信号的合理特征参量。这对声发射检测信号分析技术的发展具有重大的科研和工程实际意义。

参考文献:

- [1] KWON J R, LYN G J, LEE T H, et al. Acoustic emission testing of repaired storage tank[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001(78): 373-378.
- [2] 李一博, 孙立瑛, 靳世久, 等. 大型常压储罐底板的声发射在线检测[J]. 天津大学学报, 2008, 41(1): 11-16.
- [3] 戴光. 压力容器安全工程学[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1995.
- [4] MURTHY CRL, DATTA GURU B, RAO AK. Application of pattern recognition concepts to acoustic emission signals analysis[J]. Acoustic Emission 1987, 6(1): 19-28.
- [5] MOEVUS M, ROUBY D, GODIN N, et al. Analysis of damage mechanism sandas sociated acoustic emission int woSiC/[Si - B - C] composites exhibiting different tensile curves. PartII: Unsupervised acoustic emission data clustering[J]. Compos Sci Technol, 2008, 68(6): 1258-1265.
- [6] MAC QUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]. Proceedings of the 5th Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. University of California Press; 1967: 281-97.

参考文献:

- [1] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 李以善, 刘德镇. 焊接结构检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] 封秀敏, 刘丽婷. 焊接结构的无损检测技术[J]. 焊接技术, 2011(6): 51-54.
- [5] 聂毓琴, 孟广伟. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [6] 张燕宏, 李志远. 焊接结构件焊缝缺陷的无损检测技术研究[J]. 机电产品开发与创新, 2003(2): 27-29.
- [7] 杨杰. 声发射信号处理与分析技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.