

铝合金焊缝电涡流磁场信号的非线性特征提取及分类方法研究*

高鹏 王超[†] 支亚 李旻 王立玢 丛正

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2013年12月25日收到; 2014年2月13日收到修改稿)

采用巨磁电阻(GMR)传感器对铝合金惰性气体保护焊缝的涡流电磁信号进行提取. 采用非线性特征分析的方法对良好、含有密集气孔和未焊透三种不同状态焊缝的涡流电磁信号的特性进行分析. 提取焊缝涡流电磁信号的Lyapunov指数、关联维数等参数进行分析, 分析结果表明焊缝涡流电磁信号具有明显的非线性混沌特性. 采用Lempel-Ziv复杂度和近似熵测度分析三种状态焊缝涡流电磁信号的复杂度, 结果表明: Lempel-Ziv复杂度和近似熵对不同状态焊缝的涡流电磁信号是敏感的, 可以得到焊缝的电磁信号的非线性特征, 并对焊缝的类别进行分类辨识, 为分析焊缝的不同状态提供了一种有效的辅助工具和方法.

关键词: 涡流电磁信号, Lyapunov指数, 关联维数, 复杂度

PACS: 41.20.-Q, 84.32.Hh, 85.75.Bb

DOI: 10.7498/aps.63.134103

1 引言

铝合金具有质量轻、强度高以及可重复利用等优良特性, 被广泛应用于现代工业及交通运输工具的制造^[1]. 由于铝合金特殊的理化性质, 惰性气体保护焊被广泛应用于铝合金的焊接. 焊接过程是一个带有各种干扰的复杂多变的物理化学过程, 具有非线性和时变性特征^[2,3].

焊接过程的非完全可控和铝合金特殊的理化性质使得铝合金焊缝中容易产生缺陷, 常用的焊缝缺陷无损检测方法包括: 渗透检测(PT)、磁粉检测(MT)、射线检测(RT)、超声检测(UT)和涡流检测(ET)等, 其中, 电涡流检测具有无需耦合剂、非接触、速度快等优点, 被广泛应用于各类金属材料的无损检测与评估^[4,5]. 特别是当被测试件带有表面涂层或本身为非铁磁性材料时, 电涡流检测具有明显的优势^[6-8]. 对于焊接缺陷的电涡流检测, 焊接表面的纹理带来的背景噪声对焊接缺陷的电涡流检测造成了很大困难^[9]. 支持向量机^[10]和神经网络

等^[6]很多软测量方法被用于对焊缝进行分析, 但是选择恰当的反映焊缝信息的特征量是各种软测量方法提高焊缝状态辨识能力的关键.

近年来, 非线性动力学分析方法已经成为理解、分析和处理复杂系统和信号的一种重要工具^[11-14]. Lyapunov指数^[15]、分形特性^[16,17], Lempel-Ziv复杂度^[18-20]以及近似熵^[21,22]等是分析非线性复杂系统的重要参数, 其中, Lyapunov指数和分形维数是判断混沌特性的重要指标^[23]; Lempel-Ziv复杂度和近似熵则是刻画复杂系统的动力学结构的重要复杂性测度^[24-26].

焊接过程非线性特性也会在焊缝电涡流检测信号中有所体现, 在超声焊缝状态分析中, 非线性方法被引入^[27], 但是对于焊缝涡流电磁信号的非线性分析和分类方法仍然较少. 本文利用非线性特性分析方法分析焊缝的涡流电磁信号, 揭示焊缝的涡流电磁信号所反映的焊缝非线性动力学特征, 以期从复杂的焊缝电涡流磁场信号中提取有效的描述焊缝质量的特征量.

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-10-0621)和国家自然科学基金(批准号: 11272229)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wangchao@tju.edu.cn

2 实验数据提取方法及预处理

为了研究铝合金焊缝电涡流磁场信号的非线性特征, 本文选择铝合金材料的良好焊缝(gw)、单面未焊透焊缝(lp)、密集气孔焊缝(bh)三种情况下的电涡流磁场信号. 为了对焊缝磁场的非线性动力学特征全面准确评估, 实验中分别对焊缝及焊缝周边区域进行分析. 如图1所示, 实验系统由检测探头、数据采集系统和移动平台组成. 检测探头由激励线圈和传感器电路组成, 激励线圈采用矩形均匀涡流线圈, 可以在激励线圈下方产生均匀稳定的交流正弦磁场; 检测探头的信号采集采用巨磁电阻(GMR)传感器, 可以直接采集被测区域的磁场信号, 巨磁电阻传感器的输出信号经过差分放大后进入到数据采集系统. 数据采集系统以Xilinx XC3S400 FPGA为核心, 包括激励信号通道、感应电压测量通道、通信电路和电源电路组成. 数据采集系统对采到的数据进行数字解调, 解调后的信号存储到计算机中, 进行进一步的分析处理.



图1 电涡流检测系统实验装置及检测平台

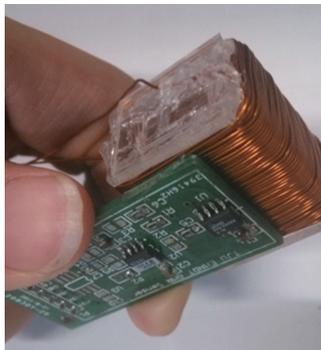


图2 电涡流检测探头线圈及电路

实验用被测铝合金焊接试件采用同一焊接条件下天然形成的良好焊缝、单面未焊透焊缝、密集

气孔焊缝进行测试. 检测过程中, 被测试件固定于XY平面坐标平台, 匀速移动扫描平台, 检测探头位置固定, 探头沿焊接方向扫描焊缝. 为了避免平台的移动引起的微小振动, 降低平台运动速度, 平台运动速度为0.1 mm/s, 每移动0.1 mm, 采样一次数据.

在实验中对8组密集气孔焊缝, 8组良好焊缝, 8组未焊透焊缝, 总共24组样本进行分类分析, 每组数据长度750个. 为了减少数据中噪声信号的影响, 采用滑动平均滤波对信号进行预处理, 综合考虑消除噪声影响并尽可能保留数据有效信息, 滑动窗口的宽度选择5, 预处理后的三种焊缝的典型涡流磁场检测输出电压信号如图3所示.

从图3可以看出, 良好焊缝、未焊透和密集气孔焊缝电涡流磁场信号曲线有一定区别, 但难于根据波动信号曲线直接对焊缝状态进行分析, 因此本文引入电涡流磁场信号的非线性特征参数, 将涡流磁场信号曲线转化为非线性参数指标, 从而进一步分析焊缝状态和焊接缺陷类型.

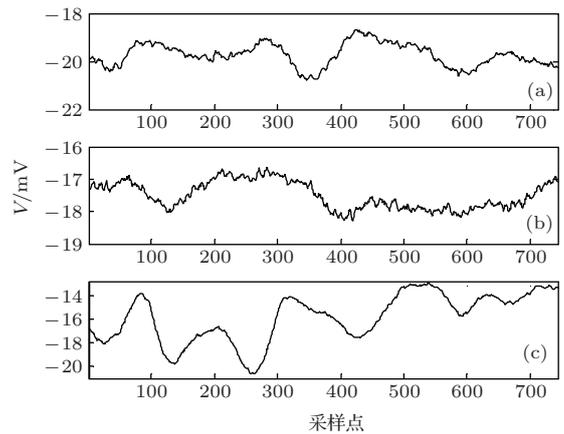


图3 滤波后三种焊缝的典型涡流磁场检测信号 (a)良好焊缝; (b)未焊透焊缝; (c)密集气孔焊缝

3 非线性特征分析

3.1 李雅普诺夫指数

最大Lyapunov指数不仅是一个重要的不变量, 而且是反映混沌动力学系统的重要参数. Lyapunov指数刻画了系统对初值的敏感性, 它反映了系统轨线在状态空间不同方向上被压缩或伸展的程度. 在相空间中, 令 $x(t)$ 是 $x(0)$ 沿着轨道演化时间 t 后的状态, 最大Lyapunov指数定义为

$$\lambda_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{t} \ln \left[\frac{|x(t) - x\varepsilon(t)|}{\varepsilon} \right], \quad (1)$$

其中 $x(t)$ 为参考轨道, 且有 $|x(t) - x\tau(t)| = \varepsilon$. 对于采集到的经过预处理的各组信号, 经过 Lyapunov 指数的求解, 各数据样本的最大 Lyapunov 指数 (λ_1) 如图 4 所示. 从图中可见, 各组数据的最大 Lyapunov 指数均为正值, 表明其既非稳定定态也非周期运动, 而是具有典型混沌特性的非线性信号.

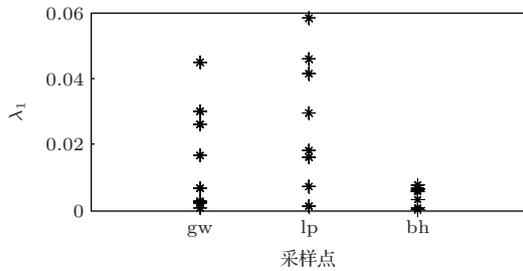


图 4 三种焊缝的涡流磁场检测信号 Lyapunov 指数分布

3.2 关联维数

焊缝本身具有自相似的分形特性. 分形特征是非整数的、分数的维数, 是分形的一个重要特征参数, 其已突破一般拓扑维的整数集界限, 是混沌系统独特的自相似的几何结构. 关联维数可以被用于对焊接过程的短路过度电弧进行分析^[28], 本文采用关联维数 D_2 研究焊缝电涡流磁场检测输出电压

信号的分形混沌特性.

根据 CC 方法、自相关方法计算可得时间延迟^[29], 用 Cao^[30], FNN^[31] 估计嵌入维数. 时间序列经过相空间重构后得到 $X_i = [x(i), \dots, x(i + (m - 1)\tau)]$ 其中, m 为嵌入维数, τ 为延迟时间, $i = 1, \dots, N - (m - 1)\tau$. 对于重构的相空间, 计算该状态空间中向量 X_i 的关联积分

$$C_m(r) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} H(r - \|X_i - X_j\|), \quad (2)$$

其中, $N_1 = N - (m - 1)\tau$ 是 m 维嵌入状态空间中向量 X_i 的个数, r 为给定的向量的“点对”距离, $\|X_i - X_j\|$ 为点对 X_i 的距离, H 为 Heaviside 阶跃函数

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (3)$$

则 N_1 充分大, r 充分小时, 得到关联维数 D_2 , 即

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r}. \quad (4)$$

如表 1 所示, 三种状态下的焊缝涡流电磁信号的关联维数均为非整数, 且均小于嵌入维数 m , 再次反映出其信号既不是随机的也不是无界的.

表 1 对不同样本的关联维数和嵌入维数计算结果

样本	关联维数	嵌入维数	延迟时间	样本	关联维数	嵌入维数	延迟时间
gw1	1.5889	8	17	lp5	1.7487	12	29
gw2	0.7723	12	14	lp6	1.7192	10	29
gw3	1.3822	10	9	lp7	2.8888	11	7
gw4	2.4692	8	6	lp8	1.0835	9	9
gw5	0.9152	8	15	bh1	2.0043	6	14
gw6	2.2403	10	12	bh2	2.0354	6	9
gw7	2.4428	6	11	bh3	2.3236	10	14
gw8	2.2660	10	14	bh4	2.3053	9	14
lp1	2.5543	6	3	bh5	2.2894	9	13
lp2	1.4538	12	31	bh6	2.3906	7	13
lp3	2.1087	5	33	bh7	2.2723	8	13
lp4	1.9365	7	28	bh8	2.4013	9	10

4 焊缝的复杂性测度分类辨识

4.1 Lemper-Ziv 复杂度

复杂度表征序列的非规则程度, 其实质是先对序列值符号化, 然后进行编码, 最后计算复杂度特征^[32]. 复杂度隐含着整个系统的运动规律, 与熵一

样可以度量系统运动的混乱或无序的程度.

Lemper-Ziv 复杂度是 Lempel 和 Ziv 提出的一种度量符号序列复杂性的算法, 是对某一时间序列随其长度的增加而出现新模式的速率的反映^[18]. Lemper-Ziv 复杂度是对任意给定的有限长度符号序列复杂性的度量, 计算方便, 可以用于段序列的研究^[26].

首先将缺陷数据 $S\{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ 进行粗粒化处理. 设其平均值为 \bar{s} , 用二进制的两个数字 (0, 1) 组成的符号序列替代时间序列. 替代原则为时间序列中大于 \bar{s} 的数取为1, 小于 \bar{s} 的数取为0. 这样就将时间序列变为只含“0”和“1”的符号序列, 亦即将时间序列转化为符号序列, 符号序列和时间序列拓扑共扼.

Lemper-Ziv 算法: 记时间序列 S 的 Lemper-Ziv 复杂度为 C , 首先设 S 的符号序列是 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_r\}$, S 后的一个或一串字符 s_{r+1} 或 s_{r+2}, s_{r+3} 称为 Q , 两者连接得到 SQ . 令 $SQ\pi$ 表示一串字符 SQ 减去最后一个字符, 然后看 Q 是否属于 $SQ\pi$ 中已有的“字句”. 若是属于 $SQ\pi$ 中已有的“字句”, 称之为“复制”, “复制”时 Q 向后追加一个字符或字符串, 然后重复以上步骤; 若不属于 $SQ\pi$ 中已有的“字句”, 称之为“添加”, “添加”时 Q 向后取一个字符或字符串替代 Q 原来的符号序列, 同时将一个“.”添加到 SQ 后面, 下一步将 SQ 序列“.”前所有字符看成 S , 重复以上步骤直到 SQ 等于要分析的字符串. 这样便得到 SQ 中以“.”为标志的分段数, 也就是它的 Lemper-Ziv 复杂度 $c(n)$. 对符号序列反复操作以后, 最后得到一个 $c(n)$ 趋于定值:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} c(n) = b(n) = n / \log_2^n, \quad (5)$$

$c(n)$ 越大, 表征动力系统越复杂, 反之动力系统规律性越强. 为了排除序列长度对最后结果的影响, 对 $c(n)$ 进行归一化处理, 即归一化复杂度

$$C(n) = c(n) / b(n). \quad (6)$$

在计算序列的 Lemper-Ziv 复杂度时, 需要粗粒化处理, 这种粗粒化处理可能改变系统的动力学特性^[33]. 本文采用2符号(0, 1)粗粒化(LZC2)和4符号(0, 1, 2, 3)粗粒化(LZC4)两种方式分析序列的 Lemper-Ziv 复杂度. 其中4符号粗粒化的 Lemper-Ziv 复杂度计算方式与2符号类似. 图5所示三种焊缝的2符号粗粒化 Lemper-Ziv 复杂度分类结果, 大量的样本点存在交叉混叠现象. 图6所示三种焊缝的4符号粗粒化 Lemper-Ziv 复杂度分类结果, 只有少数的样本点存在混叠, 其他绝大多数样本点能够进行清楚的分​​类识别. 图6所示的 Lemper-Ziv 复杂度计算结果比图5所示的 Lemper-Ziv 复杂度计算结果的区分度要好, 表明对于焊缝的涡流电磁信号, 4符号(0, 1, 2, 3)粗粒化 Lemper-Ziv 复杂度包含了更丰富的信息, 可以

更好的对焊缝的涡流电磁信号进行非线性动力学描述, 其分类效果也更好.

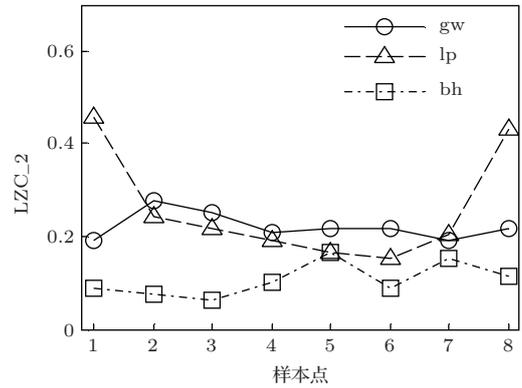


图5 三种焊缝的涡流磁场检测信号2符号粗粒化 Lemper-Ziv 复杂度

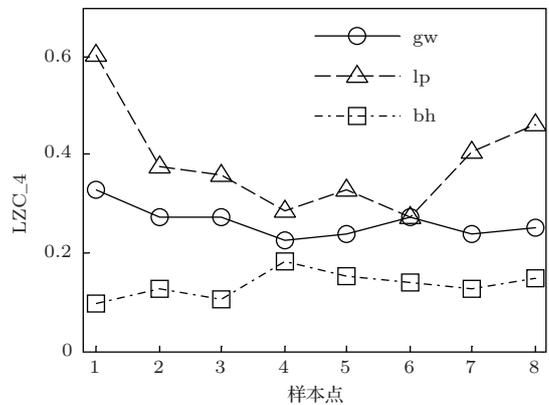


图6 三种焊缝的涡流磁场检测信号4符号粗粒化 Lemper-Ziv 复杂度

4.2 近似熵测度分析

Pincus 从衡量序列复杂性的角度出发, 提出了时间序列近似熵 (ApEn) 计算方法, 并成功应用于生理信号的非线性分析中. 近似熵定义的是高维空间中相矢量的聚集程度, 是从多维角度来计算序列的复杂性, 包含了时间模式的信息^[12]. 对于给定的 N 点时间序列 $\{u(i)\}$, 其近似熵可通过如下步骤得到:

1) 将序列 $\{u(i)\}$ 按顺序组成 m 维矢量 $X(i)$, 即

$$X(i) = [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)], \quad (7)$$

其中 $i = 1 - N - m + 1$.

2) 对每一个 i 值计算矢量 $X(i)$ 与其余矢量 $X(j)$ 之间的距离

$$d[X(i), X(j)]$$

$$= \max_{k=0-m-1} |u(i+k) - u(j+k)|. \quad (8)$$

3) 给定阈值 $r (r > 0)$, 对每一个 i 值统计 $d[X(i), X(j)] < r$ 的数目及此数目与总的矢量个数 $N - m + 1$ 的比值, 记作 $C_i^m(r)$, 即

$$C_i^m(r) = \frac{\{d[X(i), X(j)] < r \text{ 的数目}\}}{n - m + 1}. \quad (9)$$

4) 先将 $C_i^m(r)$ 取对数, 再求其对所有 i 的平均值, 记作 $\Phi^m(r)$, 即

$$\Phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r). \quad (10)$$

5) 再对 $m + 1$ 重复 1)–4) 的过程, 得到 $\Phi^{m+1}(r)$.

6) 最后定义近似熵

$$\text{ApEn}(m, r) = \Phi^m(r) - \Phi^{m+1}(r), \quad (11)$$

式中 m 是预先选定的模式维数, r 是预先选定的相似容限. 近似熵从多维角度来计算时间序列的复杂性, 反映了新模式发生率随维数而增减的情况, 因而反映了数据在结构上的复杂性.

如图 7 所示, 从三种焊缝的涡流磁场检测输出电压信号的近似熵可以看出, 三种焊缝的近似熵有明显不同, 未焊透焊缝的近似熵较大说明其涡流电磁信号的复杂度更大, 气孔焊缝的涡流电磁信号的近似熵最小说明其信号的复杂度最小. 同时从图 6 和图 7 的对比可以看出, 近似熵与 4 符号粗粒化 Lempel-Ziv 复杂度的测量结果表现出一定的相似性, 也同时相互验证了采用非线性分析方法分析焊缝电磁信号的有效性.

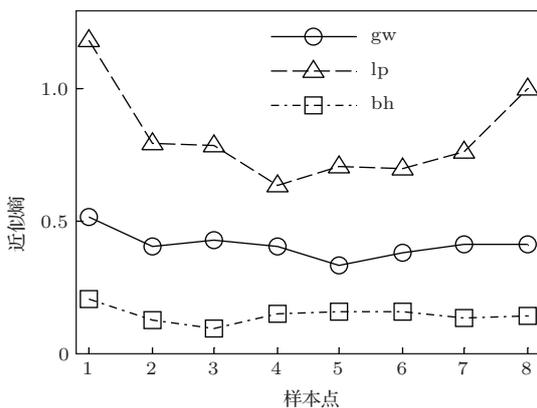


图 7 三种焊缝的涡流磁场检测信号的近似熵

4.3 焊缝的双参数复杂性测度分类

图 8 所示为采用 4 符号粗粒化 Lempel-Ziv 复杂度和近似熵的分析结果, 通过 4 符号粗粒化

Lempel-Ziv 复杂度与近似熵参数能够对良好焊缝、未焊透焊缝和密集气孔焊缝进行区分, 不存在不同种类焊缝之间的混叠现象. 同时从图 8 中可见, 所有的焊缝数据样本点大体上位于图中所示的对角线位置, 表明 4 符号粗粒化 Lempel-Ziv 复杂度与近似熵的测量结果表现出很好的一致性.

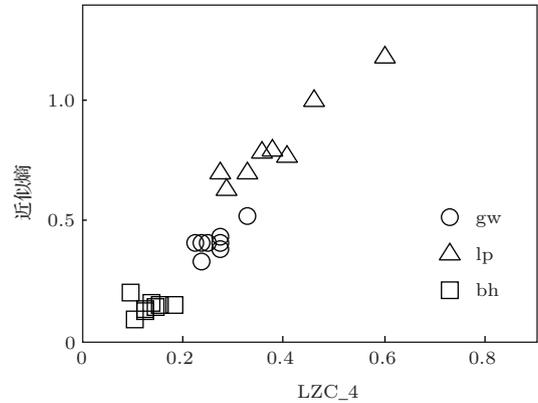


图 8 三种焊缝的复杂性测度分类

5 结 论

本文通过计算焊缝的涡流电磁信号的 Lyapunov 指数和关联维数, 发现其具有明显的混沌特性. 通过 Lempel-Ziv 复杂度和近似熵分析, 发现它们对未焊透、良好焊缝和密集气孔焊缝具有良好的表达特性, 以此为基础, 可从复杂的焊缝电涡流磁场信号中提取有效的描述焊缝质量的特征量.

本文从焊缝的整体非线性特性角度上对焊缝质量进行评估, 可有效表达未焊透、良好焊缝和密集气孔焊缝的非线性特性, 但对于气孔的位置和大小难以给出准确的信息.

参考文献

- [1] Zuo D G, Li F, Hua X M, Wu Y X 2007 *Electr. Weld. Mach.* **37** 1 (in Chinese)[左敦桂, 李芳, 华学明, 吴毅雄 2007 电焊机 **37** 1]
- [2] Zhang W C, Yang L J, Lv X Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 152 (in Chinese)[张伟超, 杨立军, 吕小青 2011 物理学报 **60** 152]
- [3] Cao B, Xiang Y P, Lv X Q, Zeng M, Huang S S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 865
- [4] Fan M B, Yin Y D, Cao B H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 088105 (in Chinese)[范孟豹, 尹亚丹, 曹丙花 2012 物理学报 **61** 088105]
- [5] Hao K S, Huang S L, Zhao W, Wang K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078103 (in Chinese)[郝宽胜, 黄松岭, 赵伟, 王坤 2011 物理学报 **60** 078103]

- [6] Rao B, Raj B, Jayakumar T, Kalyanasundaram P 2002 *NDT & E Int.* **35** 393
- [7] Yusa N, Janousek L, Rebican M, Chen Z, Miya K, Chigusa N, Ito H 2006 *Nucl Eng Des* **236** 1852
- [8] Yusa N, Machida E, Janousek L, Rebican M, Chen Z, Miya K 2005 *Nucl Eng Des* **235** 1469
- [9] Allweins K, Kreutzbruck M V, Gierelt G 2005 *J Appl Phys* **97** 10Q1021
- [10] Ye B, Huang P J, Fan M B, Gong X, Hou D B, Zhang G X, Zhou Z K 2009 *Nondestruct Test Eva* **24** 19
- [11] Du M, Jin N D, Gao Z K, Zhu L, Wang Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 230507 (in Chinese)[杜萌, 金宁德, 高忠科, 朱雷, 王振亚 2012 物理学报 **61** 230507]
- [12] Jin N D, Dong F, Zhao S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 720 (in Chinese)[金宁德, 董芳, 赵舒 2007 物理学报 **56** 720]
- [13] Jin N D, Zheng G B, Hu L Y 2006 *Chinese J. GEO-PHYS* **49** 1552 (in Chinese)[金宁德, 郑桂波, 胡凌云 2006 地球物理学报 **49** 1552]
- [14] Luo X L, Wang J, Han C X, Deng B, Wei X L, Bian H R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 028701
- [15] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, Vastano J A 1985 *Physica D* **16** 285
- [16] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Physica D* **9** 189
- [17] Grassberger P, Procaccia I 1984 *Physica D* **13** 34
- [18] Lempel A, Ziv J 1976 *IEEE T Info Theory* **22** 75
- [19] Zhang D Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3152 (in Chinese)[张佃中 2007 物理学报 **56** 3152]
- [20] Kaspar F, Schuster H G 1987 *Phys Rev A* **36** 842
- [21] Zhao J Y, Jin N D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094701 (in Chinese) [赵俊英, 金宁德 2012 物理学报 **61** 094701]
- [22] Pincus S M 1991 *Proc Natl Acad Sci. USA* **88** 2297
- [23] Han C X, Wang J, Che Y Q, Deng B, Guo Y, Guo Y M, Liu Y Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5880 (in Chinese)[韩春晓, 王江, 车艳秋, 邓斌, 郭义, 郭永明, 刘阳阳 2010 物理学报 **59** 5880]
- [24] Zhuang J Z, Ning X B, Zou M, Sun B, Yang X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2805 (in Chinese)[庄建军, 宁新宝, 邹鸣, 孙飙, 杨希 2008 物理学报 **57** 2805]
- [25] Cai J P, Li Z, Song W T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1871 (in Chinese)[蔡觉平, 李赞, 宋文涛 2003 物理学报 **52** 1871]
- [26] Hou W, Feng G L, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3940 (in Chinese)[侯威, 封国林, 董文杰 2005 物理学报 **54** 3940]
- [27] Vieira A P, Moura E P, Goncalves L L, Rebello J M A 2008 *Chaos, Solitons and Fractals* **38** 748
- [28] Lv X Q, Cao B, Zeng M, Huang S S 2005 *Trans. China Weld. Ins.* **26** 65 (in Chinese)[吕小青, 曹彪, 曾敏, 黄石生 2005 焊接学报 **26** 65]
- [29] Fraser A M, Swinney H L 1986 *Phys Rev A* **33** 1134
- [30] Cao L 1997 *Physica D* **110** 43
- [31] Abarbanel H D I, Kennel M B 1993 *Phys Rev E* **47** 3057
- [32] Reinbacher K A, Magele C, Renhart W 2012 *Int J Appl Electrom* **39** 157
- [33] Men X, Shen E H, Gu F J, Qiu Z C 2000 *Acta Biophys. Sin.* **16** 701 (in Chinese)[孟欣, 沈恩华, 顾凡及邱志诚 2000 生物物理学报 **16** 701]

Extraction of nonlinear characteristics from eddy current magnetic field of Al-alloy weld and their classification*

Gao Peng Wang Chao[†] Zhi Ya Li Yang Wang Li-Bin Cong Zheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 25 December 2013 ; revised manuscript received 13 February 2014)

Abstract

GMR (giant magneto resistance) sensor can be used to measure the eddy current magnetic field of the Al-alloy weld. The nonlinear time series analysis method is introduced to study the signals from the eddy current magnetic field of the weld in three different states, which include good, lack of penetration, and clustered blowhole weld. Several nonlinear characteristic parameters, such as Lyapunov exponent and correlation dimension etc., are extracted. The results show that the eddy current magnetic field of the Al-alloy weld has distinguished chaotic features. Analysis of the Lempel-Ziv complexity and approximate entropy for different signals leads to the conclusion that these two complex measures are sensitive to the eddy current magnetic field of the weld zone. Through these methods, nonlinear characteristics of eddy current magnetic field of the weld can be obtained for identifying and classifying the type of the weld, which will serve as an efficient supplementary diagnostic tool to reveal different patterns of the welds.

Keywords: magnetic field signals, Lyapunov exponent, correlation dimension, complexity

PACS: 41.20.-Q, 84.32.Hh, 85.75.Bb

DOI: [10.7498/aps.63.134103](https://doi.org/10.7498/aps.63.134103)

* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No.NCET-10-0621), and the National Natural Science Foundation of China (Grant no. 11272229).

[†] Corresponding author. E-mail: wangchao@tju.edu.cn