

基于电流样本熵的脉冲 MIG 焊稳定性评定

谢煌生¹, 傅智河¹, 王悦新¹, 徐敏², 薛家祥²

(1. 龙岩学院 机电工程学院, 龙岩 364012; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要: 针对焊接稳定性定量评定困难的特点, 提出了一种基于电流样本熵的焊接稳定性评定方法。随着电信号稳定性降低, 样本熵均值变大, 样本熵标准差也变大, 选用样本熵的均值与标准差的乘积来量化焊接稳定性。讨论了嵌入维数、给定阈值和样本长度对样本熵的影响, 对于研究的脉冲 MIG 焊电流信号, 当 $m = 2$, $r = 0.08$, $N = 2000$ 时, 样本熵分布合理, 计算所耗时间较小。最后做了三组脉冲 MIG 焊对比试验。结果表明, 通过样本熵的均值与标准差的乘积评定的焊接稳定性与实际焊缝质量效果吻合; 在相同给定电流下, 样本熵的均值与标准差的乘积越大, 焊接稳定性越差。

关键词: 样本熵; 定量评价; 焊接稳定性; 焊缝质量

中图分类号: TG 434 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)10-0095-05

0 序 言

电流信号包含了大量反映焊接工艺性能及焊接质量的信息, 电流信号的稳定性是制约工艺性能的重要因素。分析和处理电流信号, 有助于深入研究电弧机理, 改善焊接质量, 并客观评定工艺性能^[1]。国内外众多学者对焊接过程的稳定性进行了探讨, 并引入了近似熵(approximate entropy, ApEn)的概念, 对焊接过程稳定性进行了定量描述。近似熵是 Pincus 为了克服混沌现象中求解熵的困难所提出来的, 它主要用于度量信号中产生新模式的概率大小, 序列越复杂, 产生新模式的概率越大, 相应的近似熵也越大^[2]。Tolle 等人^[3]发现 GMAW 焊过程中随着送丝速度的增加, 电弧电压的近似熵增加。吕小青等人^[4]对 CO₂ 焊电流信号进行了近似熵分析。聂晶等人^[5]利用神经网络预测铝合金 P-MIG 焊近似熵, 并取得较好效果。张伟超等人^[6]从非线性动力学近似熵测度的角度对铝合金脉冲 MIG 焊的电弧电压信号进行分析, 认为在自适应控制模式下, 近似熵越小, 自适应控制越成功, 控制越有效。由于近似熵受数据长度和嵌入维数影响较大, 一致性相对较差, 2000 年 Richman 在近似熵的基础上提出一种新的时间序列复杂性测度方法—样本熵(sample entropy, SaEn)^[7]。样本熵与近似熵类似, 都是一种度量序列复杂性和统计量化的非线性动力学参数, 用一个非

负数来表示某个时间序列的复杂性。不同在于, 样本熵不计自身匹配值, 降低了 ApEn 的误差, 一致性和精度更好, 计算速度也比较快^[8]。利用焊接电流样本熵对脉冲 MIG 焊工艺稳定性进行研究尚未见报道。样本熵算法流程如下。

原始数据为 N 个点的序列 $u(1), u(2), \dots, u(N)$, 当嵌入维数为 m 和 $m + 1$ 时, 数据序列的前 $N-m$ 个向量, 需要满足当 $1 \leq i \leq N-m$ 时, m 维向量 $X_m(i)$ 有意义。

(1) 按序号重构一组 m 维矢量, 即

$$X_m(i) = [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)] \quad (i = 1, 2, \dots, N-m+1)$$

(2) 定义 $X_m(i)$ 与 $X_m(j)$ 的距离 $d[X_m(i), X_m(j)]$ 为两者对应元素中最大差值的一个, 即

$$d[X_m(i), X_m(j)] = \max_{0 < k < m-1} (|u(i+k) - u(j+k)|) \quad (2)$$

(3) 对于每一个 i ($1 \leq i \leq N-m$), 统计 $d[X_m(i), X_m(j)]$ 小于给定阈值 r 的数目 $N^m(i)$, 求其与距离总数 $N-m$ 的比值, 即

$$B_r^m(i) = N^m(i) / (N-m) \quad (3)$$

(4) 求 $B_r^m(i)$ 对所有 i 的平均值, 即

$$B^m(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} B_r^m(i)}{N-m+1} \quad (4)$$

(5) 维数加 1, 得到 $m+1$ 维矢量, 即

$$X_{m+1}(i) = [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m)] \quad (i = 1, 2, \dots, N-m) \quad (5)$$

(6) 重复步骤(2), (3), (4) 对于 $m+1$ 维矢量

求,即

$$B_r^{m+1}(i) = N^m(i)/(N - m - 1) \quad (6)$$

$$B^{m+1}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} B_r^{m+1}(i)}{N - m} \quad (7)$$

(7) 理论上次序列对应的样本熵为

$$\text{SampEn}(m, r, N) = \lim \{-\ln[B^{m+1}/B^m(r)]\} \quad (8)$$

若 N 为有限值时可表示为

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\ln[B^{m+1}/B^m(r)] \quad (9)$$

由步骤(1)至(7)可知,样本熵计算需要确定嵌入维数 m ,相似容限 r ,样本长度 N 三个参数,不同的 m 和 r 对应的样本熵也不同. 目前还未见 m, r 的取值的理论指导,就目前的研究来看 m 一般选择在 2 ~ 10 之间, r 通常取原始数据标准差的 0.1 ~ 0.5 倍. Lake 等人^[9] 认为在 m 较小, r 较大的情况下,样本熵值分布正常,少量的数据遗失点对熵值的计算也不会影响. 由于数据序列越复杂对应的样本熵也越大,文中首先利用样本熵进行了数据电流信号的分析,通过对比样本熵均值及式(10)定义的样本熵标准差两个指标来分析电流信号的稳定性,即

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (10)$$

式中: n 为样本熵的计算组数, x_i 为第 i 组样本熵的计算值, \bar{x} 为 n 组样本熵的平均值.

1 电流信号样本熵分析

1.1 不同电流信号对样本熵的影响

选择占空比为 20%, 脉冲频率为 100 Hz, 峰值电流为 300 A, 基值电流为 50 A 的四个焊接波形, 波形质量分别为好、较好、较差、差作为样本进行研究. 为了研究结果的一致性和所定分析标准的通用性, 样本进行了归一化处理.

选择嵌入维数 m 为 2, 给定阈值 r 设为 0.07, $N = 2000$, 共 200 ms 的数据量依次进行样本熵计算. 每个信号计算 16 个样本熵值, 对应的曲线为 SaEn1 至 SaEn4.

分析结果如图 1 所示, 可以看出电信号越规整对应的样本熵越小, 不同采样组数对应的样本熵的值大小越一致; 随着电信号稳定性降低, 样本熵均值变大, 不同采样组数对应的样本熵不确定性越大.

采用式(10)对图 1 的四个样本计算标准差. 电信号从好至差对应的样本熵的标准差为 9.728 8e-004, 0.002 0, 0.006 3, 0.007 3, 表现出从小到大的

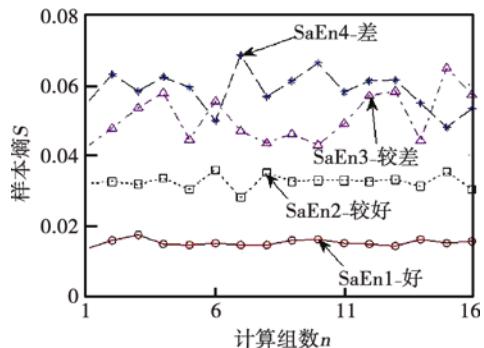


图 1 典型电流信号样本熵变化

Fig. 1 Changes in approximate entropy of current signals

变化规律. 可知样本熵的均值和标准差可以用来量化焊接过程稳定性. 因此设计了公式(11)所示电流信号稳定性评定指标 CSaEn, 为 SaEn 与标准差的乘积. CSaEn 越大, 焊接稳定性越差.

$$CSaEn = SaEn \times SD(SaEn) \quad (11)$$

1.2 嵌入维数 m 值对样本熵的影响

为了获得最佳的评定效果, 先研究不同的 m 值对样本熵计算结果的影响. 选用焊接过程稳定的电流信号进行研究. 每组 2000 个信号, 进行 16 组试验, r 取 0.07, m 从 1 至 4 变化. 样本熵变化规律如图 2 中曲线 SaEn5 至 SaEn8 所示. 可以看出, 在 m 取值不同时, 样本熵变化的曲线形状相似, m 越大, 样本熵变化范围越小. SaEn5 至 SaEn8 对应的标准差分别为: 0.001 2, 9.8841e-004, 8.3227e-004, 7.2098e-004, 可以看出标准差相差都不大. 考虑到随着 m 的增加, 计算时间会增加; 另外一方面, 为了拉开区分度, 更好地设计工艺性能定量评价模型, 将稳定过程电信号样本熵的标准差确定为 0.001 以内, 所以在后续的分析中, m 取值都为 2.

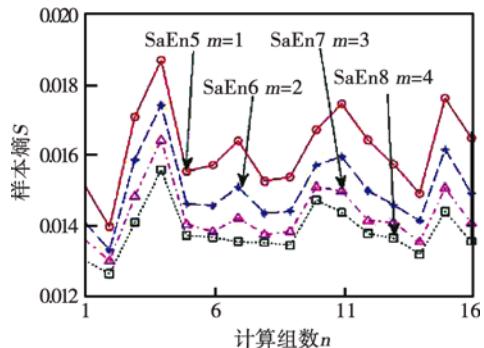


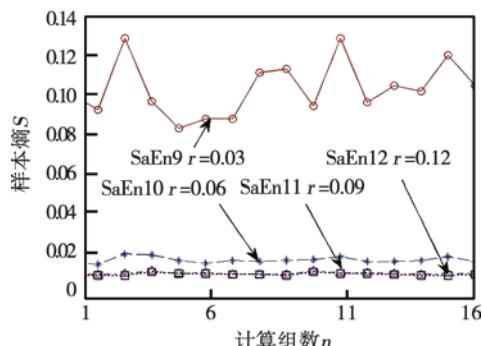
图 2 样本熵随 m 变化情况

Fig. 2 Sample entropy changes with m

1.3 给定阈值 r 对样本熵的影响

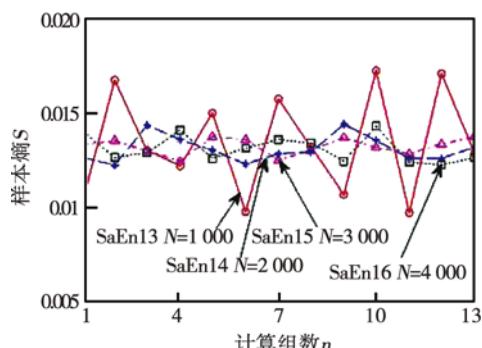
一般来说给定阈值 r 的取值是根据样本的标准

差确定的, 多为样本标准差的 0.1~0.5 倍, 对于上述电信号, 计算得标准差为 0.320 6, 故设定 $r = 0.03, 0.06, 0.09, 0.12$ 进行仿真试验研究。试验结果如图 3 中曲线 SaEn9 至 SaEn12 所示。可以看出当 r 为 0.03 时, 稳定信号的样本熵分布并不稳定, 变化远大于其余三条曲线。 $r = 0.06$ 时, 样本熵迅速降到 0.02 左右, 形状较平稳。随着 r 的继续增大, 样本熵进一步减小, 当 r 为 0.09 和 0.12 时, 由于分布太接近, SaEn11, SaEn12 已经基本重合了。计算 SaEn9 至 SaEn12 四条分布曲线的标准差, 随着 r 从 0.03~0.12, 标准差分别为 0.013 3, 0.001 5, 6.1233e-004, 5.5274e-004。考虑到之前提出的稳定规范下样本熵分布的标准差宜在 0.001 左右, 则 r 选取 0.07~0.08 之间较为适宜。

图 3 样本熵随 r 变化情况Fig. 3 Sample entropy changes with r

1.4 样本长度 N 对样本熵的影响

对于给定信号, 设 $m = 2, r = 0.08$, 样本长度 N 分别为 1 000, 2 000, 3 000, 4 000 进行仿真试验研究。试验结果如图 4 所示。可以看出当 N 为 1 000 时, 样本熵 SaEn13 分布并不稳定, 不确定性远大于其余三条曲线。 N 为 2 000, 3 000, 4 000 时样本熵 SaEn14 至 SaEn16 比较接近, 没有呈现出明显的规

图 4 样本熵随数据长度 N 变化情况Fig. 4 Sample entropy changes with data length N

律性。随着 N 从 1 000 至 4 000, 四条分布曲线的标准差分别为 $0.0044, 7.2049 \times 10^{-4}, 5.0090 \times 10^{-4}, 7.4145 \times 10^{-4}$ 。从结果可以看出 N 较小的时候, 样本熵不稳定, 标准差较大, 当 N 为 2 000 之后, 样本熵分布已经比较稳定。SaEn14 对应的标准差比 SaEn6 小是因为 SaEn14 试验中 r 增大了。由于信号长度大于 2 000 点后, 样本熵没有呈现明显的变化规律, 反而增加了时间花费, 故综合考虑 N 选取 2 000 左右较为适宜。

综上, 不同的 m, r, N 取值, 对样本熵的计算结果有较大影响。对于脉冲 MIG 焊电流信号, 为了取得较好的区分度, m 应尽量小, 选择 1, 2 均可; r 可以适当大一点, 在信号标准差的 0.2 倍左右为宜; N 不宜过大, 以免计算量太大, 耗时过多, 一般可取 10~20 个脉冲周期的数据长度。对于所研究的脉冲 MIG 焊电流信号当 $m = 2, r = 0.08, N = 2 000$ 时, 样本熵分布合理, 计算所耗时间较小。

脉冲 MIG 焊相对其它焊接方式而言, 参数更多, 对于不同焊接参数的电信号, 仅仅比较其样本熵值的大小并不科学, 还要考虑频率、电流、占空比等参数对样本熵的影响。在以下的试验中选用相同频率, 基值电流, 峰值电流和占空比的电流来做基于样本熵的稳定性分析。

2 试验方法

试验母材为 $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的 Q235 钢板, 焊丝为直径 $\phi 1.2 \text{ mm}$ 牌号 ER50-6 焊丝。试验采用自己研制的多功能数字化焊机。焊接过程中电流和电压使用自己研制的电弧动态小波分析仪采集。该小波分析仪能够计算瞬能量、动态电阻和电弧信号概率分布密度图。试验用工控机型号为 Advantech G610, 数据采集卡为 Advantech PCL-1800。试验装置如图 5 所示。



图 5 试验装置

Fig. 5 Experimental setup

在焊接过程中, 脉冲基值电流 50 A, 基值时间 7.5 ms, 峰值电流 390 A, 峰值时间 2.5 ms。焊接方

式为平板堆焊,电流类型为单脉冲。焊前先用铁丝刷打磨掉试件A母材表面的氧化膜,试件B部分打磨,试件C不打磨,并且氧化层较厚。其它焊接参数如表1所示。

表1 焊接条件和参数

Table 1 Welding condition and process parameters

平均电流 I/A	气流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_1/(m \cdot \text{min}^{-1})$	焊丝伸出长度 L/mm	焊接速度 $v/(cm \cdot \text{min}^{-1})$
135	18	4.8	15	80

试验的焊接电流波形图如图6所示。

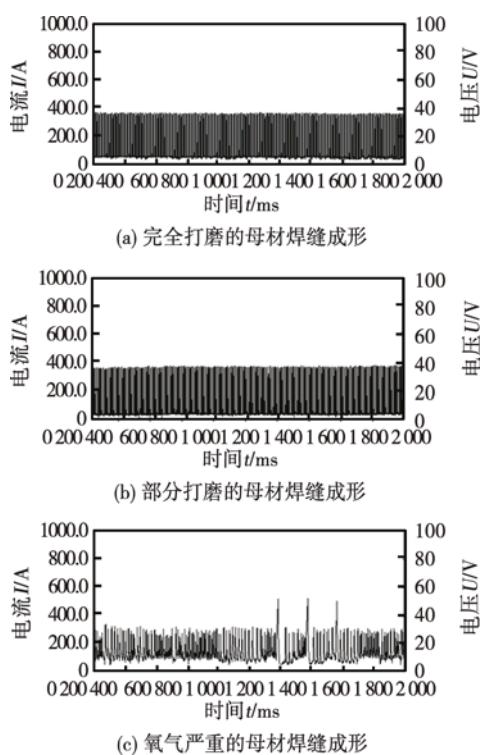


图6 不同母材焊接电流波形图

Fig. 6 Welding current waveforms of different base metal

3 试验结果与讨论

用MATLAB软件计算图6所示电流的样本熵。在计算过程中, $m=2$, $r=0.08$, $N=2000$ 。电流信号的采样频率为20 000 Hz,因此以上2 s的电流波形,对应40 000个采样值,每隔2 000个采样点计算一次样本熵,得到20个样本熵计算值。用ORIGIN绘出不同试验的样本熵值,如图7所示。

由图7可知,试验A的样本熵波动小,其平均值为1.915 5,标准差0.102 1, $CSaEn=0.195 6$;试验B样本熵波动较小,平均值为2.207 8,标准差0.097 1, $CSaEn=0.214 4$;试验C样本熵波动较大,其平均

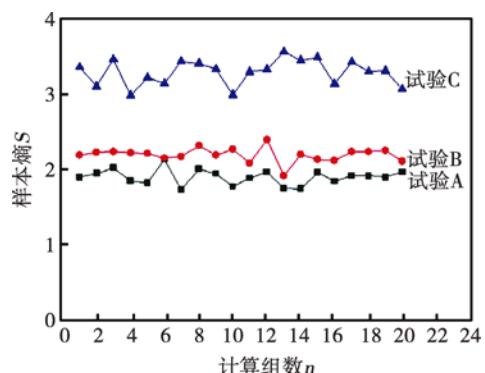
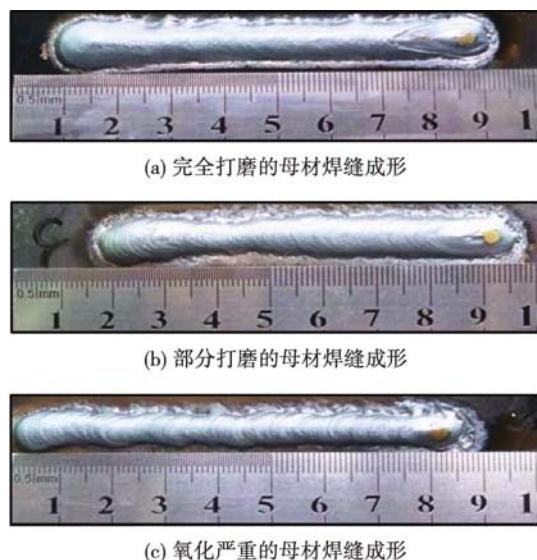


图7 三次试验样本熵

Fig. 7 Sample entropy of three experiments

值为3.296 2,标准差0.168 3, $CSaEn=0.549 0$ 。根据计算结果评定试验A获得的焊接稳定性最好,B次之,C最差。3组试验所得到的焊缝图如图8所示。



(c) 氧化严重的母材焊缝成形

图8 不同母材焊缝成形

Fig. 8 Weld profiles of different base metal

如图8所示,试验A所得的焊缝表面光滑,宽度均匀,焊缝表面几乎没有飞溅,焊缝质量最好。试验B所得的焊缝宽度不均匀,焊缝质量次之。试验C所得的焊缝宽度变化较大,而且没有与母材完全熔合,焊缝表面飞溅较多,焊缝质量最差。预测结果与实际评定效果吻合。

在相同的焊接电流和匹配的其它焊接参数下,焊接电流样本熵的均值和标准差的乘积可以较好地预测和评定由油污、氧化物、夹杂物等外部环境为变量的脉冲MIG焊的稳定性。然而当给定焊接电流、送丝速度、焊接速度或气体流量等控制量不同时,序列的复杂性不同,样本熵的总体分布规律不同,焊接

电流样本熵的均值和标准差的乘积不能反映焊接稳定性。

4 结 论

(1) 焊接电流样本熵的均值和标准差可以用来量化焊接过程稳定性。设计了焊接过程的稳定性评定指标—电流样本熵的均值与标准差的乘积, 其可以量化焊接稳定性。

(2) 随着电流信号稳定性降低, 样本熵均值变大, 样本熵标准差也变大。在相同给定电流下, 电流样本熵的均值与标准差的乘积越大, 焊接稳定性越差。

(3) 通过电流样本熵的均值与标准差的乘积评定的焊接稳定性与实际焊缝质量效果吻合。

参考文献:

- [1] 高理文, 薛家祥, 陈辉, 等. 基于自相关分析的电弧焊熔滴过渡过程稳定性的定量评价[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 29–32, 114.
Gao Liwen, Xue Jiaxiang, Chen Hui, *et al.* Quantitative evaluation on metal transfer process stability of arc welding based on auto-correlation analysis[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 29–32, 114.
- [2] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 88(6): 2297–2301.
- [3] Tolle C R, Laviolette R A, Smartt H B, *et al.* Is there evidence of determinism in droplet detachment within the gas metal arc welding process[C] // 6th International conference on Trends in Welding Research, APRIL, 2002: 15–19.
- [4] 吕小青, 林建平, 曹彪, 等. CO₂ 焊不同过渡形态下电流信
号的近似熵分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(7): 17–21, 113–114.
Lü Xiaoqing, Lin Jianping, Cao Biao, *et al.* Approximate entropy analysis of current signal in different transfer modes of CO₂ arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(7): 17–21, 113–114.
- [5] 聂晶, 石玗, 黄健康, 等. 铝合金 P-MIG 焊稳定性近似熵神经网络预测[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 77–80, 116–117.
Nie Jing, Shi Yu, Huang Jiankang, *et al.* Approximate entropy GRNN forecast for aluminum alloy pulsed MIG welding stability[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 77–80, 116–117.
- [6] 张伟超, 杨立军, 吕小青. 基于近似熵测度的铝合金 P-MIG 亚射流过渡自适应控制研究[J]. 物理学报, 2011, 60(02): 152–160.
Zhang Weichao, Yang Lijun, Lü Xiaoqing. Approximate entropy based meso-spray transfer analysis of Al-alloy pulsed metal inert-gas welding under self-adapting control[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(02): 152–160.
- [7] Richman J S, Moorman J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. American Journal of Physiology-heart and Circulatory Physiology 2000, 278 (6): 2039–2049.
- [8] Alcaraz R, Rieta J J. A novel application of sample entropy to the electrocardiogram of atrial fibrillation[J]. Nonlinear Analysis Real World Applications, 2010, 11(2): 1026–1035.
- [9] Lake D E, Richman J S, Griffin MP, *et al.* Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability[J]. American Journal of Physiology-heart and Circulatory Physiology, 2002, 283 (3): 789–797.

作者简介: 谢煌生, 男, 1962 年出生, 本科, 副教授。主要从事逆向工程、机电技术、机器视觉等研究。发表论文 10 余篇。Email: xhs2796127@163.com