

岳建锋, 黄云龙, 赵旺, 等. 中厚板 V 型坡口 GMAW 电弧声信号焊缝偏差识别方法研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(9): 1474-1481

中厚板 V 型坡口 GMAW 电弧声信号 焊缝偏差识别方法研究

岳建锋¹, 黄云龙¹, 赵旺¹, 刘文吉¹, 刘海华¹, 郝迎斌²

(1. 天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387;

2. 河北岳泓智机科技开发有限公司, 河北衡水 053000)

摘要:针对中厚板 V 型坡口 GMAW(熔化极气体保护焊)焊缝偏差识别问题,提出一种新型基于电弧声信号的中厚板 GMAW 摆动焊焊缝偏差识别方法。在 V 型坡口摆动焊接中,发现当摆动中心与焊缝中心出现偏差,电弧声信号呈现明显非对称性。为此,针对电弧声信号的时域和频域特征开展了进一步研究,明确了与焊缝偏差信号存在密切关联的电弧声摆动极限位置能量差、标准差、小波包第 7 频带和第 8 频带能量等特征参量。构建基于上述 4 类参量的 GS-SVR 非线性回归方程,通过电弧声特征信号检测,可实现焊接过程中焊接偏差信息的在线识别,通过左右偏差试验表明该模型具有良好精度,可满足工程实际生产需要。

关键词:焊缝偏差; GMAW; 电弧声; 偏差识别

中图分类号: TG409

DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20220093

文献标志码: A

文章编号: 1003-8728(2023)09-1474-08

Study on Weld Seam Deviation Method of GMAW Arc Sound Signal in V-groove of Medium Thickness Plate

YUE Jianfeng¹, HUANG Yunlong¹, ZHAO Wang¹, LIU Wenji¹,

LIU Haihua¹, XI Yingbin²

(1. Tianjin Key Laboratory of Modern Mechatronics Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Hebei Yuehongzhiji Technology Development Co., Ltd., Hengshui 053000, Hebei, China)

Abstract: For the welding seam deviation recognition in GMAW welding of medium thickness plates, a weld seam deviation recognition method in GMAW swing welding of medium thickness plates based on arc sound signal is proposed. In V-groove swing welding, it is found that when the swing center deviates from the weld center, the arc sound signal presents obvious asymmetry. Therefore, the characteristics of arc sound signal in time domain and frequency domain were further studied, and the characteristic parameters, in which the energy difference of arc sound swing limit position, standard deviation, energy in the seventh and eighth band of wavelet packet were closely related to the weld seam deviation signal, were identified. The GS-SVR nonlinear regression equation based on the above four parameters was established. Through the detection of arc sound signal, the welding deviation information in the welding could be recognized online. The left and right deviation tests show that the model has good accuracy and can meet the requirement of production.

Keywords: weld seam deviation; GMAW; arc sound signal; deviation recognition

收稿日期: 2021-07-30

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2019KJ011&2019ZD07)

作者简介: 岳建锋(1973-), 教授, 研究方向为焊接自动化, billyue@163.com

中厚板结构件被广泛应用于船舶制造、桥梁建造、重型装备、海洋工程等领域中, 构件多采用焊接拼接而成^[1]。采用规划的焊接路径实施焊接时, 由于工件的安装误差、加工误差和受热变形等因素经常会导致焊枪偏离焊缝中心, 造成焊接质量降低, 焊

件力学性能变差。通过焊缝跟踪技术则可以很好规避上述问题,大幅提高焊接质量和生产效率。目前基于弧压传感和视觉传感的焊缝偏差识别方法在工程中已应用到焊缝跟踪中^[2-3]。但弧压传感存在焊接过程中受短路过渡干扰影响严重,降低了跟踪稳定性,而视觉传感因结构体积及强烈弧光的干扰等原因限制了其适用范围。电弧声信号包含了丰富的焊接信息,具有非接触采集优势,不受弧光和烟尘干扰等优势,是一种具有应用前景价值的焊缝传感手段。

目前国内外焊接学者对于电弧声信号的研究主要集中在焊接气孔、熔滴过渡、焊缝熔透等方面。Kamal等^[4]开展了熔化极气体保护焊中的声信号研究,提出可以应用电弧声时域峰度特征反映焊缝是否出现气孔缺陷。Yusof等^[5]通过希尔伯特黄变换方法分析了电弧声信号与焊接气孔的相关性。石玓等^[6]对电弧声信号采用ARMA双谱估计的方法识别不同熔滴过渡状态。高延峰等^[7]采用了一种基于人耳听觉模型的方法提取电弧声信号特征并通过支持向量机建立熔滴过渡状态识别模型。毕淑娟等^[8]通过对电弧声信号特征进行PCA融合建立了熔透状态神经网络识别模型。Wang等^[9]以听觉皮层反应为特征向量建立了中央听觉感知模型来识别焊缝熔透状态。

概括而言,以往对焊接电弧声的研究主要集中在焊接质量监测等方面,而利用电弧声信号进行焊缝偏差识别的研究未见报道。中厚板V型坡口GMAW摆动焊接过程中,发现焊枪摆动中心偏离焊缝中心后电弧声信号呈现不对称特点,研究并提取到焊接过程中能够有效表征偏差的特征参量,构建了中厚板GMAW焊缝偏差识别模型,并开展了相关试验,试验结果表明所建模型具有良好的输出精度,同时也进一步表明本文提出利用电弧声信号特征实现偏差识别的新方法是有效可行的。

1 声信号采集系统

1.1 试验系统

焊接试验系统原理图如图1所示,它由焊接系统、控制运动系统、信号采集系统三部分组成。焊接系统包括Fronius TPS3200型焊机,VR4000送丝机,焊枪和保护气瓶。控制运动系统中,通过示教器可以调节焊接参数和控制焊接工作平台。信号采集

系统通过传声器采集电弧声信号,接受控制柜发出的焊枪摆动信号,采用电容式传声器(AWA14423)和前置放大器(AWA14604)拾取电弧声信号,采样频率20 kHz,麦克距离电弧位置为30 cm。

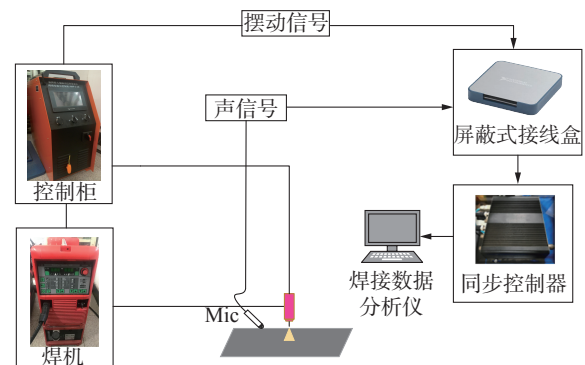


图1 焊接试验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the welding test system

母材选用了Q235低碳钢,母材尺寸为300 mm×30 mm×7 mm。焊接示意图和焊枪轨迹如图2所示,通过控制焊枪摆动中心与坡口中心的距离获得不同焊缝偏差下的电弧声信号。

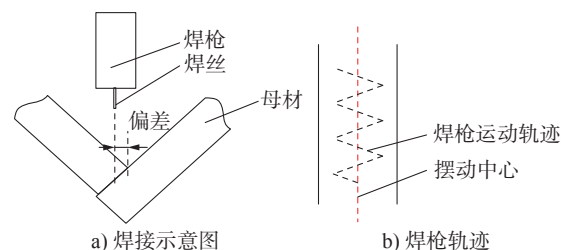


图2 试验设置

Fig. 2 Experimental setup

共进行9种不同焊缝偏差实验,分别为焊缝左偏2 mm、左偏1.5 mm、左偏1 mm、左偏0.5 mm、对中、右偏0.5 mm、右偏1 mm、右偏1.5 mm、右偏2 mm。焊接工艺参数见表1。

表1 焊接工艺参数

Tab. 1 Welding process parameters

试验参数	参数值
送丝速度/(m·min ⁻¹)	6.4
摆动幅度/mm	6
摆动频率/Hz	1.5
焊丝直径/mm	1
焊接速度/(mm·s ⁻¹)	3
保护气	82%Ar + 18%CO ₂

1.2 电弧声信号预处理

在采集信号过程中放大器受到因温度产生零点漂移和传感器周围环境干扰等因素,采集到的数据会出现偏离基线的情况^[10-12],若不消除信号的趋势项会影响信号的准确性,并给特征提取造成严重干扰。因此,针对采集到的电弧声信号首先采用多项式最小二乘法消除趋势项,方法如下。

电弧声信号采样数据为 $\{x_k\}$,设多项式函数为

$$\hat{x}_k = a_0 + a_1 k + a_2 k^2 + \cdots + a_m k^m \quad (1)$$

式中: $k = 1, 2, 3, \cdots, n$; m 为多项式函数的阶次。

确定多项式函数 $\hat{x}_k$ 的待定系数 $a_j (j = 0, 1, \cdots, m)$ 使函数 $\hat{x}_k$ 与 x_k 的误差平方和 E 最小,即

$$E = \sum_{k=1}^n (\hat{x}_k - x_k)^2 = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i=0}^m a_i k^i - x_k \right)^2 \quad (2)$$

确定函数 $\hat{x}_k$ 的多项式系数后,用原始信号减去多项式函数达到消除趋势项的目的,取 $m=1$ 消除线性趋势项,即

$$y_k = x_k - \hat{x}_k \quad (3)$$

如图 3 所示,在图 3a) 中,原始信号关于趋势对称,偏离原点,去趋势项完成后的信号在图 3b) 中整体下移,关于原点对称,此时更利于进行特征提取。

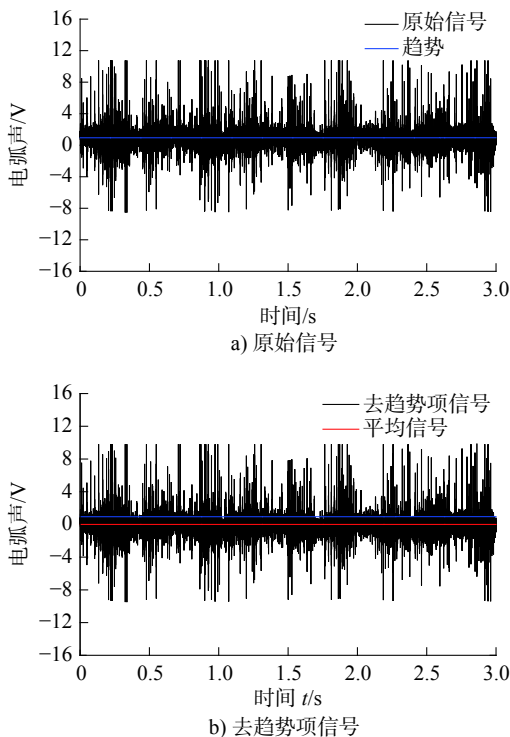


图 3 原始信号与去趋势项信号

Fig. 3 Original and detrending term signals

1.3 电弧声信号样本选取

声音信号周期性采集始于焊枪摆动的右极限位置,此时从控制器发出摆动信号置位为高电平,一直持续到焊枪摆动至左极限处(如图 4),之后摆动信号置位为低电平,到极限位置反转,依此规律重复。据此,摆动信号跳变处表征了焊枪左右极限位置。记录焊枪到达右极限位置时采集数据作为起始,向后连续记录 13 300 采样点作为一个电弧声周期样本,如图 4 所示。

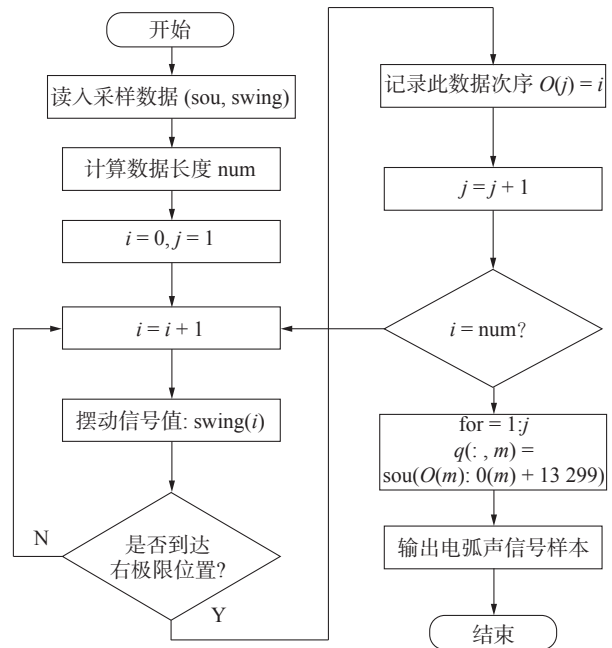


图 4 电弧声信号样本选取流程图

Fig. 4 Flowchart for arc sound signal sample selection

2 电弧声信号特征提取

2.1 时域特征提取

为了研究焊枪摆动偏离焊缝中心的位置偏差与电弧声信号之间的关联,开展了不同位置偏差时电弧声信号时域能量的对比分析。图 5 表示了焊缝中心左偏 2 mm、对中、焊缝中心右偏 2 mm 时电弧声信号和摆动同步信号的变化趋势。摆动信号周期始于摆幅右极限位置,为高电平,运动到摆幅左极限位置,电平变为低电平,周期性往复。

观察波形发现焊缝对中时焊枪右-左与左-右运动过程中的声信号波形基本对称分布,但焊缝中心出现偏差时电弧声信号波形在极限位置处发生了较为明显变化。

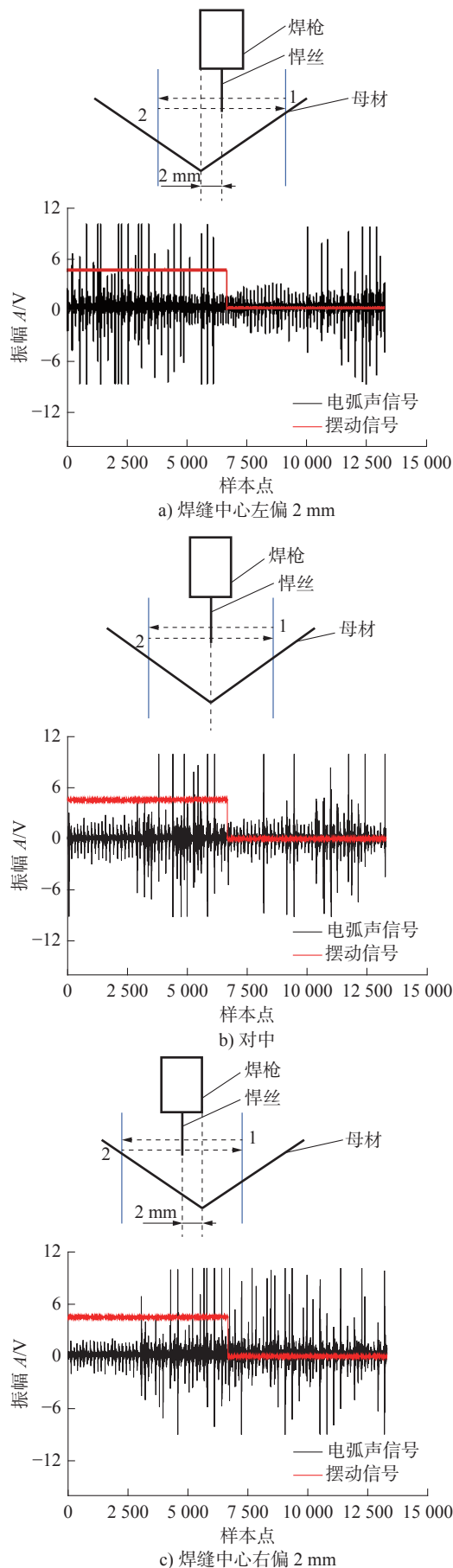


图5 电弧声信号波形对比图与焊接示意图

Fig. 5 Waveform comparison of the arc sound signal and welding schematic diagram

因此提出针对焊枪左右极限位置附近一段时间内电弧声能量,与焊缝中心偏差存在密切联系。经过多次试验,发现截取焊枪到达摆动极限位置后 75 ms 内的电弧声能量最为稳定,所以计算极限位置 75 ms 范围内两侧信号的能量和标准差后相减得到差值特征为:

$$E_{\text{dif}} = \sum_{i=1}^n x_{i,\text{right}}^2 - \sum_{j=1}^n x_{j,\text{left}}^2 \quad (4)$$

$$S_{\text{dif}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,\text{right}} - \bar{x}_{\text{right}})^2}{n-1}} - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{j,\text{left}} - \bar{x}_{\text{left}})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中: E_{dif} 为能量差值特征; S_{dif} 为标准差差值特征; $x_{i,\text{right}}$ 为右极限位置处第 i 个采样点的声压; $x_{j,\text{left}}$ 为左极限位置处的第 j 个采样点的声压; $\bar{x}_{\text{right}}$ 为右极限位置处声压均值; $\bar{x}_{\text{left}}$ 为左极限位置处声压均值; n 为 1 500。

图6所示为焊缝中心左偏 2 mm、1 mm、对中、右偏 1 mm、右偏 2 mm 的时域特征对比图。由图6可知焊缝对中时左右两侧电弧声能量和标准差差异不大,焊缝左偏时能量和标准差差值为正,右偏时为负;随焊缝偏差的增加左右两侧电弧声能量和标准差差值随之增大的规律较明显。这也表明了提取左右极限位置能量、标准差差值可以作为特征参量反映焊缝偏差的变化。

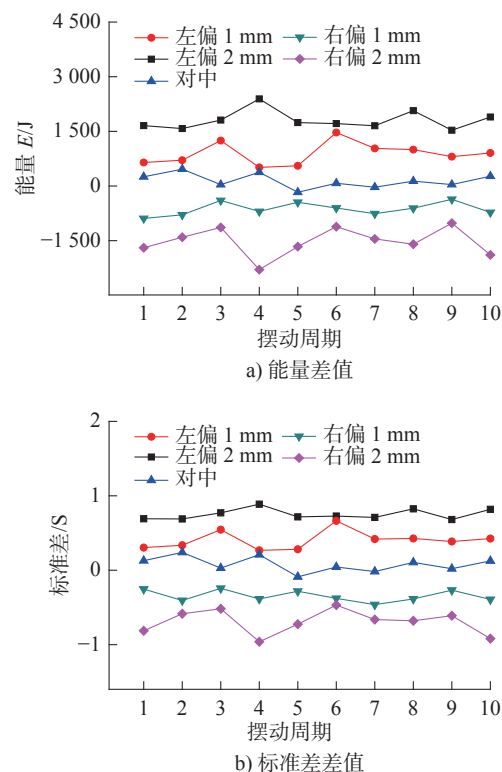


图6 电弧声信号时域特征对比图

Fig. 6 Comparison of the time-domain characteristics of the arc sound signal

2.2 小波包能量特征提取

为了能更全面掌握焊缝中心偏差导致电弧声信号的变化规律,除了开展时域特性分析,在研究中探索了焊缝中心偏差对电弧声信号频率特性的影响,并针对相关特征参量进行了分析和提取。

小波包分析方法拥有多分辨率分析特点,可以根据信号特点去改变时间和频率分辨率,实现在时间和尺度(频率)两个域中表征信号,实现对信号更加全面的分析。此外,小波包分析不仅能对信号的低频频带进行分解,也能对高频频带实施分解,从而实现精准的局部化分析。小波包分解算法为:

$$\begin{aligned} d_l^{j,2n} &= \sum_k g_{0(k-2l)} d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} &= \sum_k g_{1(k-2l)} d_k^{j+1,n} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $d_l^{j,2n}$ 、 $d_l^{j,2n+1}$ 、 $d_k^{j+1,n}$ 为小波包分解系数; $g_{0(k-2l)}$ 和 $g_{1(k-2l)}$ 分别为共轭正交低通和高通滤波器。

通过计算小波包分解后每个频带内信号的平方和得到小波包能量,任意频带对应的能量为

$$P_i = \sum_{n=1}^N |d_k^j(n)|^2 \quad (7)$$

式中: N 为原始信号长度; $d_k^j(n)$ 为第 j 层 k 节点的小波包系数, $k = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ 。本文选定 Daubechies3 (db3) 小波基,对电弧声信号样本进行三层小波包分解。

图 7 所示为焊缝左偏 2 mm、左偏 1 mm、对中、右偏 1 mm、右偏 2 mm 各 10 组样本的小波包能量特征平均值,电弧声信号能量主要分布在高频部分,6、7、8 频带随着偏差的增大均有明显的改变。其中第 6 频带的小波包能量特征中显示,左右偏差相同时出现明显的能量差,稳定性相对较差,而 7、8 频带小波包能量特征变化明显,且稳定性好,表现出随着随偏差增大频带能量逐渐降低的变化趋势,因此可选用小波包第 7 频带和第 8 频带能量作为识别焊缝偏差变化的特征。

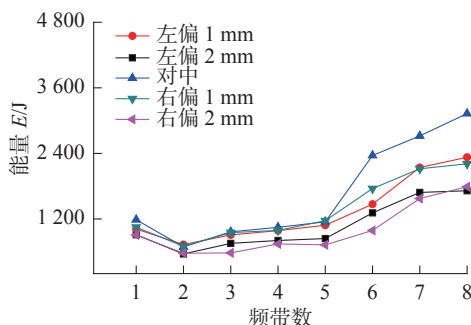


图 7 小波包能量特征对比图

Fig. 7 Comparison of wavelet packet energy characteristics

3 焊缝偏差识别模型建立

3.1 支持向量回归

从前面分析可以确定电弧声左右摆动极限位置能量差、标准差、小波包第 7 频带和第 8 频带能量都与焊缝中心偏差存在着稳定的对应关系,为了进一步提升焊缝中心偏差识别精度,研究中构建了基于上述 4 类参量的回归方程。

支持向量回归 (Support vector regression, SVR) 是一种基于支持向量机的监督学习方法,具有很强的泛化能力,在解决小样本、非线性和高维数的回归建模问题时有很大优势^[13]。其原理如下:

设给定样本 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$, $y_i \in R$, 其中 x_i 表示 n 维输入变量, y_i 表示输出量。假设回归函数为

$$f(x) = w^T x + b \quad (8)$$

引入松弛变量 ξ_i 和 $\hat{\xi}_i$, 则函数的回归拟合问题转化成最优化的问题:

$$\begin{aligned} \min_{w, b, \xi_i, \hat{\xi}_i} & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \hat{\xi}_i) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ y_i - f(x_i) \leq \varepsilon + \hat{\xi}_i \\ \xi_i \geq 0, \hat{\xi}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: C 为惩罚系数; ε 为不敏感损失 (ε -insensitive loss) 系数。通过引入拉格朗日乘子利用拉格朗日乘子法将优化问题转换成对偶问题:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha, \hat{\alpha}} & \left\{ \sum_{i=1}^m y_i (\hat{\alpha} - \alpha) - \varepsilon (\hat{\alpha} + \alpha) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\hat{\alpha} - \alpha) (\hat{\alpha} + \alpha) x_i^T x_j \right\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \hat{\alpha}_i \leq C \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

通过计算得到回归模型中参数后,得到最优的回归拟合函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha} - \alpha) K(x, x_i) + b \quad (11)$$

式中 $K(x, x_i)$ 为回归模型的核函数。

3.2 参数寻优

在 SVR 中惩罚系数 C 和核参数 g 决定了回归模型的精度,其中 C 用于调节模型的置信区间,而 g 决定样本数据的空间分布,因此 C 、 g 参数的选择至关重要。网格搜索 (Grid search) 是一种参数寻优算法,由于该算法求解速度比较快并且搜索到的最优解质量较高,因此被广泛应用于求解最佳参数的

问题中^[14-15]。采用网格搜索算法进行SVR参数寻优,构建GS-SVR焊缝中心偏差识别模型,从理论上可有效提升模型的精度。设置 C 、 g 的网格搜索寻优范围为 $[2^{-6}, 2^6]$,步长为0.5。为防止过学习和欠学习的情况发生,采用交叉验证方法(Cross validation):将全部数据平均分成5份,然后把每一份子集分别做一次验证集,其余4份子集做训练集,用得到的5个模型验证集的MSE平均值作为评价 C 、 g 参数的指标。

3.3 样本获取与模型建立

通过对电弧声信号的时频特征分析,提取对焊缝偏差敏感性较高的能量差值、标准差差值以及小波包第七、第八频带能量特征,构建四维特征向量 $T=(E_{dif}, V_{dif}, P_7, P_8)$,试验焊缝中心左偏2 mm、左偏1.5 mm、左偏1 mm、左偏0.5 mm、对中、右偏0.5 mm、右偏1 mm、右偏1.5 mm、右偏2 mm各15组数据总共135组数据,并从每种偏差条件中随机选出4组数据共计36组作为测试集,剩余的99组数据作为训练集。为了消除量纲对于支持向量回归模型影响,提升训练过程的收敛速度,需要对数据进行归一化处理。应用最大最小值归一化方法将数据映射到 $[0, 1]$ 之间,归一化处理公式为

$$y = \frac{(y_{\max} - y_{\min})(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (12)$$

式中: x 为输入数据; y 为输出数据; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为输入数据的最大值和最小值; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 分别为归一化范围的最大值和最小值。

图8为GS-SVR模型的偏差预测值和试验数值的比较。选用平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)、平方相关系数(R^2)作为衡量模型性能的指标。模型的MAE为0.1739, MSE为0.0393, R^2 为0.9787,可以看出MAE和MSE的值较小,而 R^2 接近1,模型的预测效果良好。

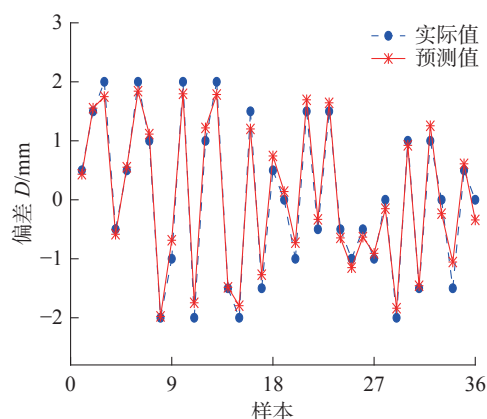


图8 GS-SVR 偏差预测图

Fig. 8 GS-SVR deviation prediction graph

4 焊缝偏差识别模型试验验证

4.1 试验方案

为了验证建立的GS-SVR理论模型有效性和精度,设计了焊缝偏差识别试验,试验方案如图9所示。将待焊工件左倾45°和右倾45°放置,形成V型坡口,分别开展焊缝右偏试验和焊缝左偏试验,试件放置示意图如图10所示。焊缝右偏试验是焊枪从焊缝对中位置运动至焊缝右偏2 mm,焊缝左偏试验使焊枪从焊缝对中位置运动至焊缝左偏2 mm,试验时采集电弧声信号数据。工件材料为Q235,厚度为7 mm,摆幅6 mm,摆动频率1.5 Hz,电弧声信号采集频率为20 kHz。

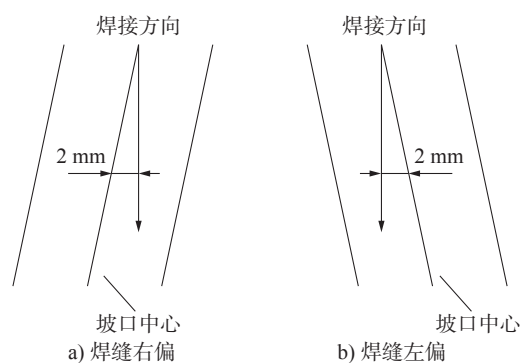


图9 试验方案

Fig. 9 Experimental plan

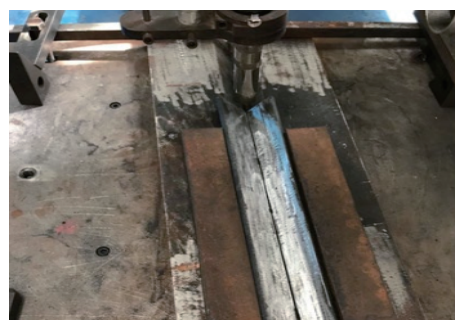


图10 试件放置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of specimen placement

4.2 试验结果分析

利用声音传感器采集电弧声信号,基于GS-SVR焊缝偏差模型计算右偏焊接试验中焊缝从对中位置右偏至2 mm的识别偏差值,并将焊接过程中的焊缝实际偏差与识别偏差值进行比较,如图11所示。从误差分布结果可以看出,在右偏焊接试验中焊缝偏差识别误差在 ± 0.5 mm以内的数据占81.8%,识别误差在 ± 1 mm以内的数据占97%,平均绝对误差为0.28 mm。

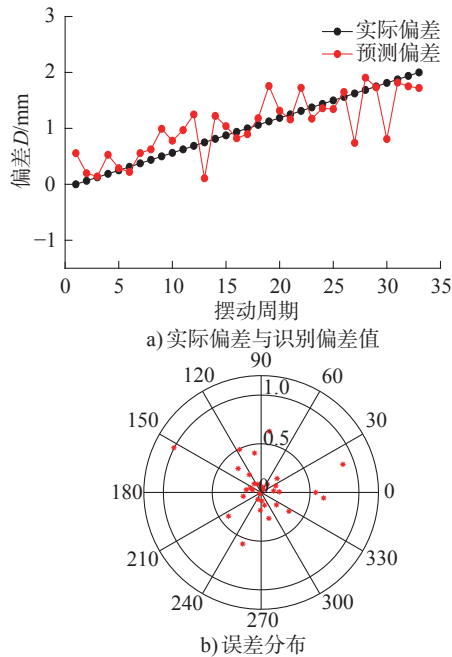


图 11 右偏试验实际焊缝偏差与识别偏差值

Fig. 11 Actual welding seam deviation and identified deviation value in the right deviation test

同理,完成模型的左偏焊接试验中焊缝从对中位置左偏至 2 mm 的偏差计算。焊缝实际偏差与模型识别偏差预测值如图 12 所示。在左偏焊接试验中识别误差在 ± 0.5 mm 以内的数据占 77.1%, 识别误差在 ± 1 mm 以内的数据占 97.1%。平均绝对误差为 0.36 mm。通过上述试验,证明了提出的 GS-SVR 偏差识别模型预测偏差的结果是有效的,可满足实际工程需要。

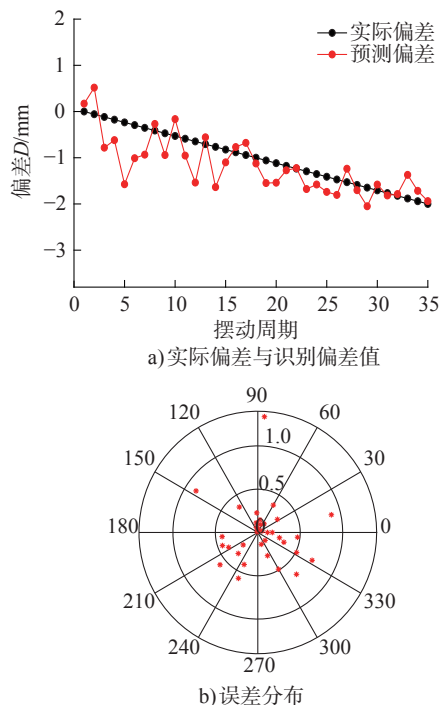


图 12 左偏试验实际焊缝偏差与识别偏差值

Fig. 12 Actual welding seam deviation and identified deviation value in the left deviation test

5 结论

1) 研究电弧声信号时域和时频域特征,发现左右极限位置的声信号能量差、标准差差值、小波包第 7、8 频带能量特征都与焊缝中心偏差存在很强的关联性,提出利用上述电弧声信号的时域和时频域特征,用于实现焊缝中心偏差预测。

2) 采用网格搜索参数寻优的支持向量回归建立 GS-SVR 焊缝偏差预测模型,试验结果表明该模型误差 MAE 为 0.1739、MSE 为 0.0393、 R^2 为 0.9787,具有较高的预测精度。

3) 开展了焊缝右偏、左偏试验,证明了本文提出的基于电弧声的焊缝跟踪偏差识别方法的有效性,为焊缝偏差识别提供了一种基于声信号检测的新方案。

[参考文献]

- [1] SHI H, ZHANG K, ZHENG J, et al. Defects inhibition and process optimization for thick plates laser welding with filler wire[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 425-432.
- [2] 乐健, 张华, 叶艳辉, 等. 基于旋转电弧传感器的角焊缝跟踪[J]. *焊接学报*, 2015, 36(5): 5-9.
LE J, ZHANG H, YE Y H, et al. Fillet weld tracking based on rotating arc sensor[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(5): 5-9. (in Chinese)
- [3] ZOU Y B, WANG Y B, ZHOU W L, et al. Real-time seam tracking control system based on line laser visions[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 103: 182-192.
- [4] PAL K, BHATTACHARYA S, PAL S K. Prediction of metal deposition from arc sound and weld temperature signatures in pulsed MIG welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 45(11-12): 1113-1130.
- [5] YUSOF M F M, KAMARUZAMAN M A, ISHAK M, et al. Porosity detection by analyzing arc sound signal acquired during the welding process of gas pipeline steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(9-12): 3661-3670.
- [6] 石玟, 黄健康, 聂晶, 等. 电弧声与铝合金脉冲MIG焊

- 熔滴过渡的相关性[J]. *焊接学报*, 2009, 30(3): 29-32.
- SHI Y, HUANG J K, NIE J, et al. Correlation of arc acoustic signals and droplet transfer in aluminum pulsed MIG welding[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2009, 30(3): 29-32. (in Chinese)
- [7] 高延峰, 王齐胜, 黄林然, 等. 基于人耳听觉模型的MIG焊熔滴过渡状态识别[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(17): 68-76.
- GAO Y F, WANG Q S, HUANG L R, et al. Droplet transfer modes identification in MIG welding process based on a human auditory model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(17): 68-76. (in Chinese)
- [8] 毕淑娟, 兰虎, 刘立君. 基于电弧声信号特征分析MAG焊熔透状态在线监测[J]. *焊接学报*, 2010, 31(5): 17-20.
- BI S J, LAN H, LIU L J. On-line monitoring of penetration status based on characteristic analysis of arc sound signal in MAG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(5): 17-20. (in Chinese)
- [9] WANG Q S, GAO Y F, HUANG L R, et al. Weld bead penetration state recognition in GMAW process based on a central auditory perception model[J]. *Measurement*, 2019, 147: 106901.
- [10] 张志勇, 刘鑫, 黄彩霞, 等. 工业平缝机的噪声源识别与运行噪声预测研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(20): 220-225.
- ZHANG Z Y, LIU X, HUANG C X, et al. Noise source identification and operating noise prediction of the industrial sewing machines[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(20): 220-225. (in Chinese)
- [11] 甘泉, 叶茂, 任珉. 高架交通沿线地面环境振动测试频域分析[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2010, 9(2): 77-82.
- GAN Q, YE M, REN M. In situ measurement and analysis for environmental vibration induced by urban traffic in time domain[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2010, 9(2): 77-82. (in Chinese)
- [12] 陆小明. 基于EMD的滚动轴承故障诊断方法的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- Lu X M. Study on rolling element bearing fault diagnosis methods based on empirical mode decomposition[D]. Suzhou: Soochow University, 2012. (in Chinese)
- [13] DRUCKER H, Burges C J C, KAUFMAN L, et al. Support vector regression machines[C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Denver: MIT Press, 1996: 155-161.
- [14] 张洁, 庞丽萍, 完颜笑如, 等. 基于脑电功率谱密度的作业人员脑力负荷评估方法[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 123618.
- ZHANG J, PANG L P, WANYAN X R, et al. Method for operator mental workload assessment based on power spectral density of EEG[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 123618. (in Chinese)
- [15] CAI L Q, XU H B, YANG Y, et al. Robust facial expression recognition using RGB-D images and multichannel features[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(20): 28591-28607.