

基于线激光扫描的工业焊缝外观检测系统

范力予, 李志勇, 杨军涛, 刘 航
(中北大学 材料科学与工程学院,太原 030051)

摘 要:文中针对表面带有鱼鳞纹的焊缝提出了工业焊缝外观检测算法:采用高维最小二乘法来拟合焊缝轮廓线,求取拟合轮廓线的二阶导数来确定焊趾范围;并基于拟合轮廓与实际轮廓间的位置偏差提取特征点,进而得到工业焊缝的形状参数. 基于上述算法,开发和调试工业焊缝检测的软硬件系统. 试结果表明,针对表面有鱼鳞纹的焊缝该算法可以稳定、准确、快速的进行检测. 工业应用表明,该系统可稳定实现焊缝轮廓数据的快速采集. 通过该系统实现对采样数据的处理计算,最后得到准确的检测结果.

关键词:线激光;工业焊缝;外观检测;最小二乘法

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150722002

0 序 言

现代焊接生产对效率和质量的要求越来越高,传统焊缝外观检测方法已不能满足高效优质焊接的要求^[1]. 焊缝外观检测的自动智能化在焊接机器人、焊缝在线检测等方面的应用具有重要意义^[2].

基于三角测量原理的激光扫描传感具有精度高、速度快的优点,被广泛应用于工业轮廓的三维检测中. 在焊接领域,激光扫描传感主要应用于焊道识别与跟踪^[3],而焊缝外观检测的应用近些年才引起人们关注. 国外学者经过研究,开发出有关的应用系统. 加拿大 Servo-Robot 公司开发的 WISC 手持式焊缝扫描仪可通过视频窗口观察焊缝三维轮廓信息^[4];Boillot 等人^[5]把 TWB 系统应用于检测激光焊外观参数和表面微观缺陷. 国内哈尔滨工业大学伏喜斌^[6]等人在激光视觉电弧焊焊缝检测研究领域进行研究,开发出相关的激光传感器检测系统. 总之,国外研究机构的产品已在焊接生产中得到应用^[7],而国内尚无成功的工业应用.

在目前的研究中,对此细节尚未见到深入的研究. 多数工业焊缝外观形状复杂,鱼鳞纹是焊缝外观成形的重要特征,忽略对鱼鳞纹的检测势必会降低检测的准确度. 因此,文中针对实际生产中带有鱼鳞纹的工业焊缝,建立合适的数学算法,对焊缝外观参数进行计算.

1 工业焊缝特征

在工业生产中,对中厚板进行焊接时,在很多情况下都需要开坡口焊接,这时需要通过电弧摆动来保证焊缝被填满,焊缝表面会因此呈现鱼鳞纹形态,表面鱼鳞纹是否均匀美观是焊缝质量评价的重要方面^[8]. 在课题进行中,发现以下几点焊缝外观形貌的特点,是设计算法时需要着重注意的.

(1) 如图 1 所示,从外观看,由电弧摆动形成的焊缝表面粗糙度明显大于不需要电弧摆动所形成的焊缝,而且带有明显的鱼鳞纹图案.

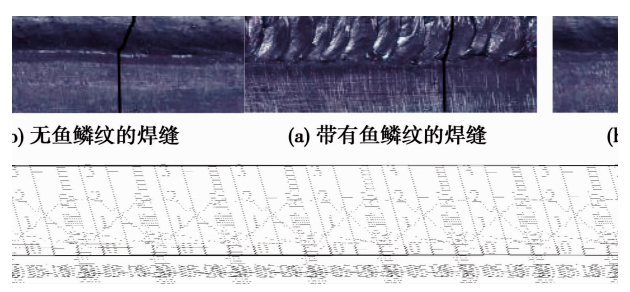


图 1 带鱼鳞纹焊缝与无鱼鳞纹焊缝
Fig.1 Appearance of surfacing weld

(2) 图 2 是轮廓线特征,合格焊缝的余高都在 2 mm 以内. 观察图 2 中可知,鱼鳞纹带来的表面起伏相对于焊缝来说并不小.

(3) 工业焊缝在焊趾处放大观察可发现焊趾位置略微下凹,在两个鱼鳞纹交界位置也会出现略微的下凹.

(4) 图 2 中由于外观粗糙度和鱼鳞纹的存在,

轮廓线呈现波动状态.

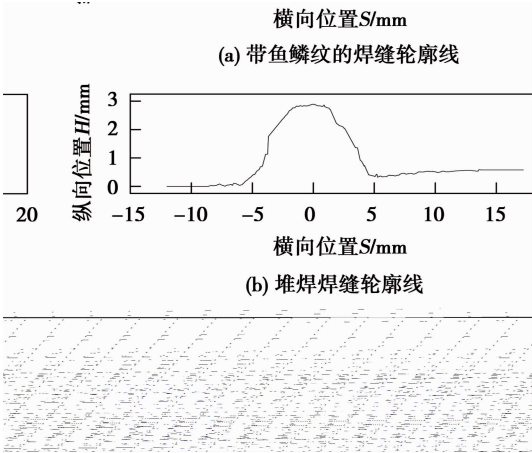


图 2 轮廓线特征
Fig. 2 Contours feature

根据上述分析可知,如何避免鱼鳞纹和粗糙度对识别焊趾边界点的影响,是算法设计从理论走向实际应用时必须解决的关键问题.也是文中在算法选择时的基本出发点.

2 工业焊缝检测的算法原理

针对上述工业焊缝的特点,文中检测算法的解决思路为:(1)采集焊缝外观轮廓的原始数据;(2)对原始数据进行必要的校正,既保留原始数据的特征又适合后续计算;(3)数据轮廓拟合方法的选择;(4)焊趾特征点的确定.

2.1 焊缝原始轮廓的旋转矫正

在焊缝检测过程中,由于线激光传感器与焊缝之间相对位置的变化,会造成原始轮廓的不同,因此有必要对其进行必要的旋转校正.在单幅轮廓中,将非焊缝区域的数据点看做分布在某直线周围的离散点,则将两焊板部分的轮廓线所构成夹角的角平分线是否垂直作为焊缝图形是否轴对称的判断依据.

通过线性拟合将焊板区域的试验数据拟合为由下列等式描述的直线,即

$$f = ax + b \tag{1}$$

式中: x 是输入序列 X ; a 是斜率; b 是截距.

常用的线性拟合方法有最小二乘法、最小绝对残差法以及 Bisquare 方法.最小二乘法应用于线性数据拟合时因简化处理而产生的误差随拟合直线斜率绝对值的增加而增大,最小绝对残差和 Bisquare 拟合方法是健壮的拟合方法,如存在超出区间的数,

可使用上述方法.图 3 是对最小二乘法、最小绝对残差和 Bisquare 拟合方法的比较结果.

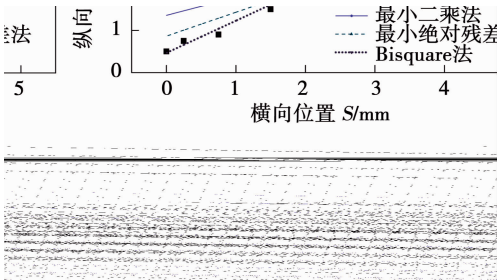


图 3 不同拟合方法的比较
Fig. 3 Comparison of different fitting methods

在大多数情况下, Bisquare 方法对于超出区间的数不如最小绝对残差方法敏感.研究中将母材部分看做平面,并不希望拟合时受到个别离散点的影响,因此选用 Bisquare 拟合方法.

(1) 分别对近似于直线的两焊板部分进行直线拟合,得到两直线与水平线的夹角 α_1, α_2 , 并由此计算两焊板之间夹角;拟合方法为 Bisquare 拟合方法,首先根据最小二乘法的公式得到的初始估计 a_0, b_0 的斜率和截距.利用公式

$$v_{\min} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i (f_i - y_i)^2 \tag{2}$$

计算最小残差 v . 其中 N 是 Y 的长度; w_i 是权重的第 i 个元素; f_i 是最佳线性拟合的第 i 个元素; y_i 是 Y 的第 i 个元素.

(2) 采用迭代的方法得到斜率和截距,利用容差判断是否终止迭代;

(3) 利用几何公式

$$\beta = \left| 90^\circ - \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} + \alpha_2 \right| \tag{3}$$

即可得到图像数据所需旋转的角度.

2.2 基于最小二乘法的单幅焊缝轮廓拟合

线激光所能覆盖的范围包括母材和焊缝.由于受到环境振动、母材和焊缝表面不平整等相关因素影响,所采集的轮廓数据存在着微小波动,其中一些微小波动对于后期轮廓边界的识别计算起着很大的作用,因此,对初期采集的每幅轮廓数据进行拟合处理十分必要.文中在 LabVIEW 中将轮廓拟合为多项式的曲线方程.

2.2.1 优化最小二乘法

在一般数据处理中,非线性最小二乘法问题可转化为线性最小二乘法问题来求解.通过对比 QR 分解和 SVD 分解法,选择后者优化最小二乘法.

(1) QR 分解法. QR 是目前求一般矩阵全部特征值的最有效并广泛应用的方法. 矩阵 A 是 $n \times k$ 矩阵,要把 $\|Ax - b\|_2$ 极小化,重新写成

$$\|QRx - b\|_2 = \|Rx - Q^Tb\|_2 \tag{4}$$

在 Euclid 范数里的向量是

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \\ e_{n+1} \\ \vdots \\ e_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & r_{nn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \\ d_{n+1} \\ \vdots \\ d_m \end{pmatrix} \tag{5}$$

式中: $d = Q^Tb$. 假设 $r_{ii} \neq 0$, 于是误差向量 e 的上面部分通过回代能变为 0, 因此通过回解上面部分而得出的 x , 使得最小二乘解极小化.

(2) 奇异值分解. SVD 是线性代数中一种重要的矩阵分解,是矩阵分析中正规矩阵酉对角化的推广,是目前最小二乘法分解中最可靠的分解方法,分解方程为

$$A = USV^T \tag{6}$$

式中: $A \in Cm \times n$, 即存在酉矩阵 U 和 V 使

$$U^TAV = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \cdots, d_r\}$, 且 $d_1 \geq d_2 \geq \cdots \geq d_r > 0$. $d_i (i = 1, 2, \cdots, r)$ 为 A 的奇异值.

对于一般的非对称 $m \times n$ 矩阵 A , 确定 SVD 有两种不同的计算方法. 第一种非常明显的方法是形成 $A^T A$ 并求它的特征值. 但如果 A 的条件数大, 那么 $A^T A$ 的条件数可能变的过分大, 由此会损失精确的数字. 幸运的是, 有另外一种避免形成矩阵乘积的求 $A^T A$ 的方法. 考虑矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 0 & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中: B 是对称的 $(m + n) \times (m + n)$ 矩阵, 因此, 它有着非负实特征值以及一组特征向量基. 设 $[v, w]$ 表示 $(m + n)$ 维向量, 它是 B 的特征向量, 那么

$$Av = \lambda w \tag{9}$$

在左边乘以 A^T 得到

$$A^T Av = \lambda A^T w = \lambda^2 v \tag{10}$$

表明 v 是 $A^T A$ 的特征向量, 相应的特征值是 λ^2 . 尽管这种方法把矩阵的大小加倍, 但是它避免了不必要的条件数的增加. 两种方法相比 QR 分解法的计算速度快于 SVD 分解法, 但稳定性不如后者, 而程序中计算量并不大, 因此最终选择使用能将不满秩矩阵广义逆的 SVD 算法.

2.2.2 多项式拟合阶数的确定

寻找最合适多项式拟合阶数是保证后续计算的关键, 试验中发现, 并不是拟合函数的误差越小越好. 因此拟合阶数的选择不完全依赖于数学理论中对拟合均方误差的判断, 还需要考虑拟合线二阶导数的影响.

LabVIEW 中支持小于 25 的多项式阶数, 不同阶数典型的拟合结果对比如图 4 所示, 通过导数确定寻趾范围如图 5 所示. 当拟合阶数为 9 时, 如图 4a 所示, 在确定左侧寻趾范围时, 这部分的轮廓出现比较密集的波动, 拟合线没有很好的反映出其中一些明显的起伏变化, 正确的范围是 11 阶拟合中 C, D 之间, 但 9 阶拟合会将范围确定在 9 阶拟合中 A, B 之间, 造成寻趾范围向左侧偏移; 当拟合阶数为 11 时, 拟合轮廓线可以很好的反应实际轮廓线的特征, 且遇到上述表面情况时, 也可以很好拟合出轮廓形状; 当拟合阶数为 12 和 12 以上时, 拟合稳定性较差, 在根据二阶导数确定寻趾范围时会出现明显误差如图 4b, 范围确定出现错误, 最终会把焊趾确定在 E 点处, 因此不予考虑; 而且即使出现焊缝区拟合十分理想的情况时, 因为之后需要利用焊趾位置数据点与拟合线的离散程度来确定特征点, 而这时的拟合情况会弱化在焊趾位置拟合与实际轮廓线的偏差, 不利于算法的实现, 因此不作为选择. 因此, 综合考虑均方误差和实际需要, 最终选择 11 作为拟合阶数.

2.2.3 焊趾特征点的提取及修正

经过上述拟合处理, 最终得到适合的拟合轮廓线, 后续工作则需要在轮廓线上寻找焊趾特征点, 再根据所确定的特征点, 依照几何关系得到焊缝的形状参数, 实现对接头几何形状特征与焊缝外观形状尺寸的检测.

轮廓线上的特征点, 即轮廓线方向变化剧烈的点或曲率的极值点, 包含焊缝形状的重要几何特征信息. 学者们构造了许多描述几何特征的参数, 如质心、距离、曲率、面积、弦切角、累计角和弦长等. 对于特征点的提取, 目前常用的方法有通过曲率、斜率、三角网络和模板匹配的方法^[9]. 这些方法的前提, 都是基于前期对轮廓数据的精确拟合. 文中利用曲线上点离散程度的不同对拟合的不同影响来确定特征点位置. 现仅取单侧焊缝(右侧)进行说明. 具体过程如下.

(1) 利用二阶导数极值点初步定位特征点所在范围. 轮廓的曲线拟合忽略了极少数离散点的微小干扰, 仅描述出轮廓变化的大致趋势, 即可反映出了焊缝的大致轮廓特征. 当焊缝为理想光滑焊缝时,

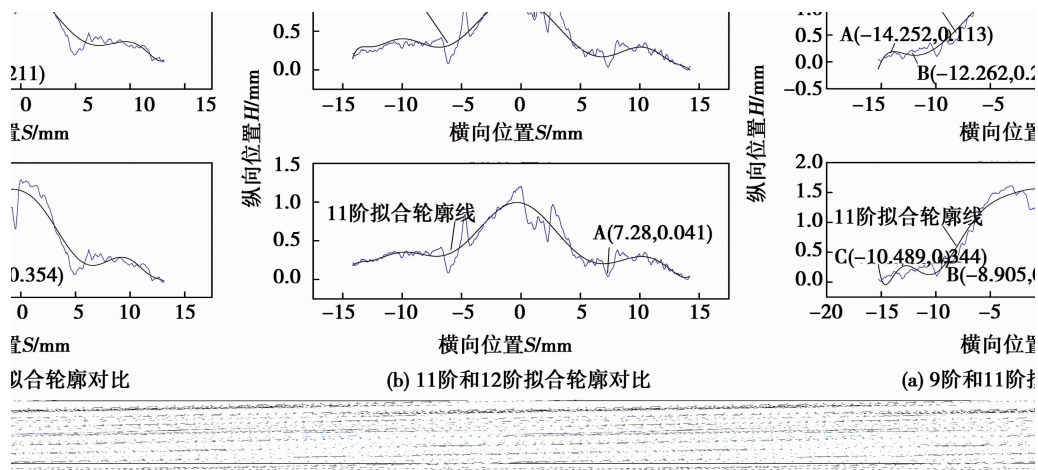


图 4 不同拟合阶数的对比

Fig. 4 Comparison of different fitting order

根据导数的几何意义从左向右判断,右侧范围内一定存在最后不小于零的点,这个点就应当是焊缝的边界特征点. 而在实际情况中,由于存在鱼鳞纹和焊接变形等因素的影响,这个特征点有可能不存在,不能作为实际的判断根据. 但是焊缝的整体轮廓形状是稳定的,根据函数一阶导和二阶导的几何意义,经过大量试验研究发现,如图 5 小于零的一阶导数逐渐趋近于零,经过或不经过零点,到达一个峰值后远离该值或趋于平缓. 在这个过程中,大于零的二阶导数极值点一定出现在焊缝边界点外侧附近,因此选择这个点作为查找焊趾边界点范围的外边界.

在位置会发生形状突变,这就使得在曲线拟合时会忽略焊趾特征点对整个轮廓造成的影响,而拟合平滑过渡的曲线. 因此,与轮廓上其它点相比,特征点与拟合曲线的偏离度最高,如图 6 所示,P 为(1)中所确定的粗测边界点,为避免附近点对拟合精度的影响,从 P 点向外侧退回 n 个点,再向内按照 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ 的顺序做差查找相差最大的点. 反过来则认为与拟合曲线偏离度最高的点即为焊趾位置.

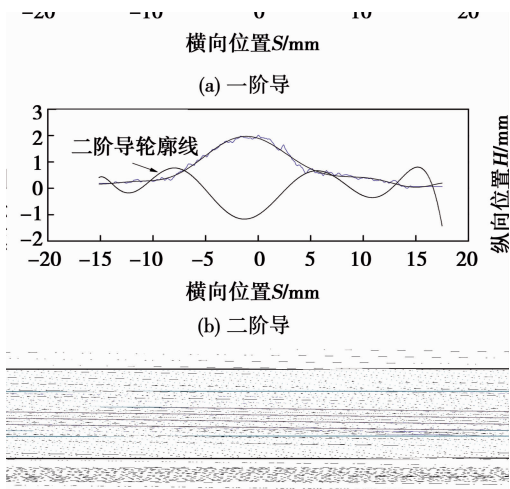


图 5 拟合轮廓线一阶导和二阶导

Fig. 5 First and second derived of fit outline

(2) 利用拟合曲线和真实轮廓线之间的偏差确定焊趾特征点. 单幅轮廓上焊趾位置的点将焊缝轮廓分为三段,两侧的焊板区和中间的焊缝区. 在这三个区间段内,轮廓变化为均匀变化,只有在焊趾所

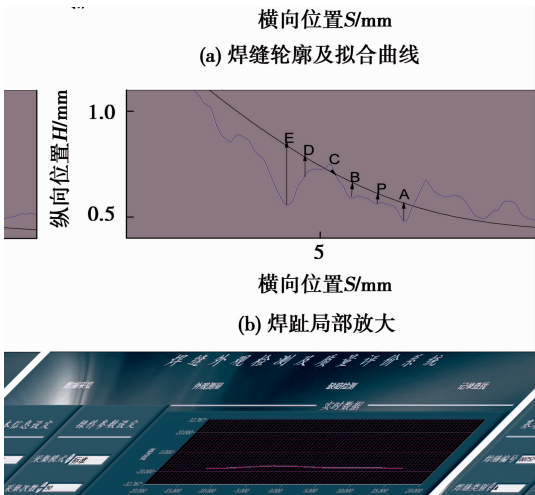


图 6 焊趾边界点的确定

Fig. 6 Obtain boundary point

根据所获得的焊缝轮廓的特征点,依据焊缝各个参量的几何定义,即可计算得到焊缝外观尺寸.

3 基于 LabVIEW 的算法的实现

根据第 2 节中所获得的焊缝轮廓的特征点,依据焊缝各个参量的几何定义,即可得到焊缝外观尺

寸. LabVIEW 的部分开发界面和三维成像效果如图 7 所示,其中图 7b 是有咬边缺陷焊缝的成像结果. 测量一条完整焊缝结果如表 1 所示,其中每个指标的均方差反应所有轮廓相应指标的波动大小,作为焊缝成形好坏的评价依据.

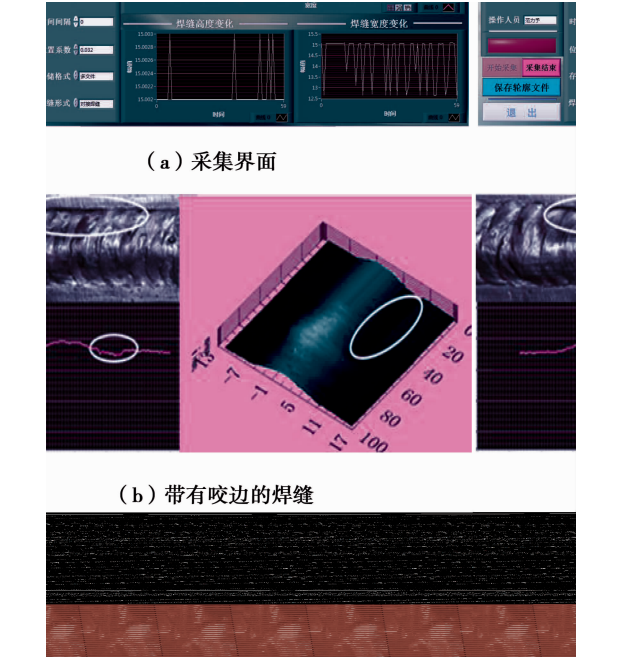


图 7 检测系统界面
Fig. 7 Detection system interface

表 1 两种方法检测结果			
Table 1 Inspection result by two meaturments			
测量方法	焊缝余高 d/mm	焊缝宽度 w/mm	角变形量 ϕ/mm
系统测量	最大值	2.204 5	13.974
	最小值	2.177 7	13.818
	均方差	0.005 52	0.028 33
传统测量	2.186	13.90	—

4 结 论

- (1) 通过采集焊缝轮廓数据,分析表面带有鱼鳞纹焊缝的形貌特征,以此为立论依据设计算法.
- (2) 采用 SVD 分解的最小二乘法对每幅轮廓进行高维拟合,得到均方误差较小且适合后期判断的轮廓. 利用曲线上点的不同离散程度对拟合的影

响来确定焊趾特征点的位置. 根据所获得的特征点,结合焊缝形状尺寸定义,计算得到各个外观形状参量.

(3) 经过验证可知该系统的精确度高,精度可达 0.000 1 mm,可以满足一般工业生产要求;系统运行稳定性好,可以可靠使用;测量范围广,可根据实际生产需求更换线激光长度.

参考文献:

[1] 赵 菁,林三宝. 用于焊接自动化过程的激光视觉传感器[J]. 电焊机, 2010, 40(11): 1-5.
Zhao Jing, Lin Sanbao. Introduction to laser sensors for automated [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(11): 1-5.

[2] 林尚杨,陈善本,李成桐. 焊接机器人及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.

[3] 雷正龙,吕 涛,陈彦宾. 基于扫描激光视觉传感的焊缝图像特征信息识别[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 54-58.
Lei Zhenglong, Lü Tao, Chen Yanbin. Features extraction for weld image of scanning laser sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 54-58.

[4] Noruk J. Visual weld inspection enter the new millennium[J]. Sensor Review, 2001, 21(4): 278-282.

[5] Boillot J P, Uota K, Berthiaume E, et al. Tracking and inspection for laser welding[C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering. Osaka:SPIE, 2002: 165-170.

[6] 伏喜斌. 激光视觉焊接过程接头状态及焊缝外观质量检测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.

[7] 伏喜斌,林三宝,杨春利,等. 基于激光视觉传感的角焊缝外形尺寸检测[J]. 焊接学报, 2008, 29(7): 47-50.
Fu Xibin, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Inspection of fillet weld shape dimension based on laser vision sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(7): 47-50.

[8] 薛家祥,魏仲华,龙 鹏,等. 铝镁合金的数字化弧焊电源及专家数据库[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 1-4.
Xue Jiaxiang, Wei Zhonghua, Long Peng, et al. Digital arc power supply for welding on aluminum-magnesium alloy and its expert database[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 1-4.

[9] 史思琦. 基于轮廓特征的目标识别研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.

作者简介: 范力予,女,1989 年出生,硕士研究生,国际焊接工程师. 主要研究方向焊接过程信息采集和质量检测方向. Email: fly0803054346@163.com

通讯作者: 李志勇,男,教授,博士研究生导师. Email: lizhiyong@nuc.edu.cn