

全自动管板焊接视觉传感图像处理

金泽石¹, 张承浩¹, 李海超¹, 王子阳^{2*}

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨阿尔特机器人技术有限公司, 哈尔滨 150001)

摘 要:为了解决换热器、冷凝器、高压加热器等工业器件中管板焊接自动化程度低、工作效率低下的问题,文中建立了一套基于被动视觉的全自动管板焊接系统.在此基础上,对视觉传感下管板焊接过程中焊接轨迹的检测与提取进行了研究,并针对管板焊接工件非均匀打磨情况下的二值化图像特征,提出了通过提取圆管内圆特征结合管壁厚度代替直接提取焊接轨迹的方法.并提出了一种多次最小二乘法迭代去除背景噪点的方法,实现了圆管内圆边缘的准确提取.通过对比人工测算圆管内圆圆心位置以及半径大小对该方法的提取精度进行了误差分析.结果表明, x 轴方向和 y 轴方向的圆心位置偏差均为 -3 pixel,半径相对误差为 1.49% .

关键词:视觉传感;管板焊接;图像处理

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151210005

0 序 言

在石油、石化、电力锅炉行业制造中,经常会遇到换热器、冷凝器、高压加热器中的管板焊接问题.现行的焊接方法主要采用手工电弧焊和半自动全位置焊机焊接等.而此类管板焊接往往存在焊接管板接头数量多、管径小、排列间距窄等问题,使得手工焊接存在一定的难点,容易产生过熔透、咬边以及焊缝热影响区重叠的问题,甚至出现焊缝粘连的焊接缺陷^[1].此外,焊缝成形效果与焊工的焊接水平、疲劳程度以及心情等因素密切相关,稳定性较差.而半自动全位置焊接相较于手工电弧焊,焊接过程更为稳定可靠,操作也更为便捷,然而由于全位置半自动焊机设备成本较高,以及焊工的间接参与,耗费了大量人力.另外,现行焊接方法恶劣的工作环境以及较低的工作效率使得全自动管板焊接系统的开发和研究成为必然趋势.

在管板焊接方面不少学者进行了相关的研究,王振民等人^[2]从工艺的角度出发,在分析换热器钛合金管板自动焊接工艺特点的基础上,利用自行研发的数字管板焊接系统进行换热器管板的全位置自动焊接试验,获得了合理的工艺参数.孟震^[3]由于焊接场所的限制进行管板焊接中的小孔径自动钨极氩弧焊,主要克服了空间限制对管板焊接的影响.

张瑞华等人^[4]对活性剂在管板全位置焊接中的应用进行了研究,突破了管板全位置焊接厚壁管时需开坡口的局限性,减少了角焊缝的焊丝填充量,节约了焊接成本,大幅度提高了焊接效率.在设备研究方面,刘永平^[5]设计了一套在深孔条件下用于焊接换热管伸出管板 5 mm 左右的专用自动焊接设备.此外,蒋文春等人^[6]对管板焊接接头残余应力进行了数值模拟研究,为优化换热器管子与管板的焊接工艺、控制残余应力提供了理论依据.由此可见,目前在管板焊接方面的研究主要集中于工艺和数值模拟方面,而在管板焊接设备方面的研究仅限于半自动焊接系统的开发.

科技的发展、人力成本的增长、产品质量的高要求以及产品生产效率的追求等,共同推动了自动化焊接的进程.现有的自动化焊接主要通过示教再现的形式来实现,主要用于结构化加工行业,而对于非结构化加工行业,普通示教再现的工作方式将不再可靠.管板焊接过程是一种典型的非结构化加工过程,其工件往往存在一定的尺寸偏差和装配误差,因此无法通过单次示教来实现所有工件的连续焊接.给自动化焊接设备配备视觉传感器,可以有效地获取工件的各种信息,实现焊接偏差的纠正,使得自动化焊接具有更强的适应性.

文中针对管板焊接自动化程度低、工作效率低下的问题,采用被动视觉传感对管板焊接过程中的焊缝检测与提取的图像处理进行了研究,并对其提取精度进行了相应的分析,为后续全自动管板焊接

的研究和实现奠定了基础.

1 试验方法

试验系统主要包括:视觉传感系统、焊接机器人以及焊接电源等,具体如图 1 所示. 视觉传感系统主要用于焊缝及其偏差的检测,并根据坐标系之间的关系对机器人的实际焊接路径进行计算. 其中焊接机器人受控于机器人控制柜,实际焊接路径由计算机根据图像处理结果计算获得,并通过 TCP/IP 协议传输实现计算机与机器人控制柜之间的通讯,最终实现由视觉传感以及计算机处理到机器人控制柜获取实际焊接轨迹的过程. 文中所用管板焊接系统采用 MIG 自动焊接,相机到管板的距离为 330 mm,照明采用环形 LED 灯,其中管略微突出于焊板,管径尺寸和壁厚没有固定要求,在系统中都适用,文中所用管直径为 52 mm,壁厚为 3 mm.



图 1 试验系统组成示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

2 图像预处理

图像处理的目的是对圆管图像与管板图像进行有效分割,并根据圆管的特征提取实际圆管圆心位置以及半径尺寸,通过焊缝与圆管之间的位置关系来计算实际焊缝位置.

文中所用摄像机采集频率为 15 fps,所获得图像分辨率为 (640 × 512) pixel. 采用图 1 所示全自动管板焊接系统中的视觉传感系统对管及管板焊接件进行检测,获得如图 2 所示未经处理的管-管板焊接零件局部原图,其中 CCD 轴线始终垂直于工件上表面以保证所检测到的圆管截面为圆形.

由图 2a,b 的比较不难发现,经过焊接预处理打磨后零件的表面反光不均匀,存在杂乱条纹,图像背景复杂,加大了实际图像处理难度.

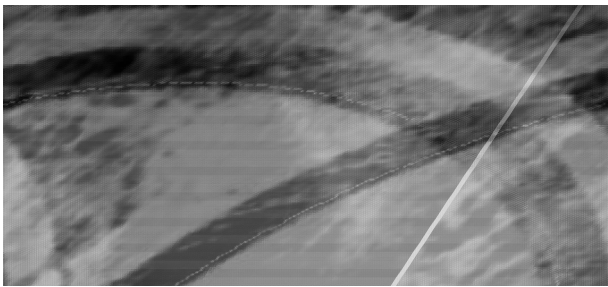


图 2 管-管板焊接零件局部图
Fig. 2 Local image of tube-tube sheet weldment

为了改善图像因零件打磨而导致信噪比降低的现象,文中采用 3 × 3 的中值滤波来对图像进行预处理以达到抑制噪声的目的,从而增大图像信噪比,其处理公式可表达为

I(i,j) = Median_{3 \times 3}(I'(i,j)) \tag{1}

式中: I'(i,j) 和 I(i,j) 分别为处理前后图像(i,j)处像素点的灰度值.

在实际图像采集过程中,可能因为光照位置的差异以及光照强度的不同而造成图像的明暗差异,从而导致单一固定阈值难以实现各种光照条件下图像的有效分割,采用一种自适应阈值法 OTSU 减弱了光照条件对最后结果的影响,其二值化处理结果如图 3 所示.

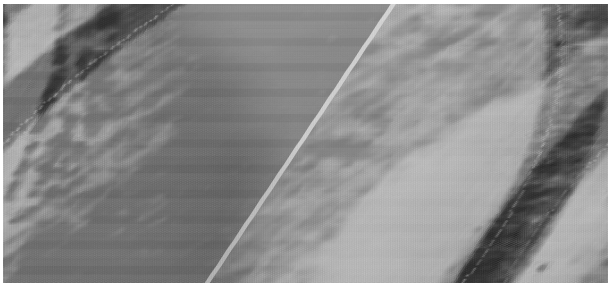


图 3 阈值处理结果
Fig. 3 Result of threshold processing

相较于未经打磨零件,经过打磨处理的零件图像处理效果较差,主要是由于零件各位置打磨均匀程度不同,而导致零件各部位的反光不同,造成管和管板表面的区分度不明显,从而难以直接提取圆管的圆心及半径特征,因此需要进一步的图像处理来解决该问题.

3 圆管特征提取

3.1 边缘提取

针对上述阈值处理结果所存在问题,结合图 2b

和图 3b 中阈值处理结果的图像特点——圆管空心处图像的灰度值远低于图像其它部位的灰度,因此提出提取圆管空心圆特征并结合圆管厚度以获得圆管特征. 在阈值处理结果的基础上对图像进行边缘提取,其结果如图 4 所示,根据图像边缘为灰度发生剧烈变化位置的特点,采用一阶导数对图像进行求导来实现横向边缘提取,图像边缘即为导数值不为零的点,具体计算过程为

$$\text{dif}(i,j) = \frac{I(i,j) - I(i,j+1)}{(j+1) - j} \tag{2}$$

$$I'(i,j) = \begin{cases} 0, & \text{if } \text{dif}(i,j) = 0 \\ 255, & \text{else} \end{cases} \tag{3}$$

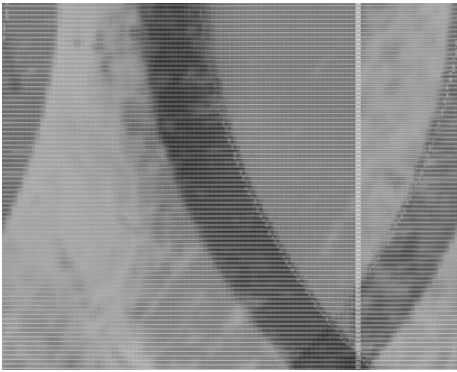


图 4 边缘提取结果

Fig. 4 Result of edge detection

根据图 4 中边缘提取结果发现,圆管内圆空心处图像占图像面积较大,从横向来看,其同行左右半圆边界之间的距离在绝大部分情况下为该行相邻边缘像素点距离的最大值,即水平方向同行内圆边缘两像素点之间的间距最大. 由此提出通过筛选距离最大的同行相邻边缘像素点来实现对于圆管内圆左右半圆边界的提取,具体处理结果如图 5 所示.

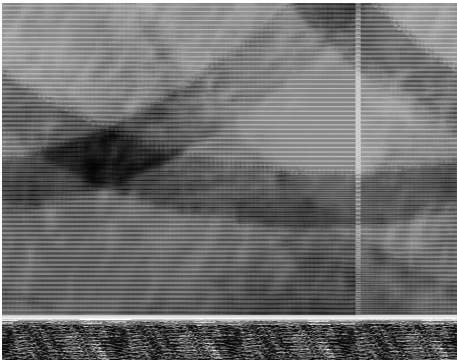


图 5 圆管内圆边缘提取结果

Fig. 5 Result of edge detection to the inside circle of tube

3.2 去噪及特征提取

图 5 提取结果除圆管内圆边缘外,还存在大量噪点,因此考虑直接采用圆形识别或先去噪后提取两种方法. 对于图像中圆的识别,目前普遍采用 hough 变换来实现,然而由于 hough 变换存在计算量大、处理时间长的问题,导致图像处理及特征提取难以实时进行,因此提出最小二乘法多次迭代去除噪点,并最终提取圆管内圆圆心位置和半径的方法. 其中圆的方程可表示为

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \tag{4}$$

式中: x,y 为圆上像素点的坐标; a,b,c 分别为所提取得到的圆方程的参数.

圆管内圆边缘点到圆心的距离的平方与半径平方的差用 ε_i 表示,即

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - R^2 \\ &= x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \end{aligned} \tag{5}$$

式中: A,B 为内圆圆心坐标; R 为内圆半径; x_i,y_i 为第 i 个边缘点坐标.

采用式(6)所示的 ε_i 平方和函数 J 的取值作为所拟合圆准确度指标,通过最小二乘法来确定各个参数值,即选取合适的 a,b 和 c 使得 J 取到极小值,此时函数 J 对 a,b 和 c 的偏导数都为 0,由此计算得到各个参数并获得拟合圆方程,即

$$J = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2 \tag{6}$$

根据所获得的圆方程,将各个边缘点代入其中,由此获得边缘点与该圆心的距离,设定距离阈值并通过距离远近判断其是否为噪点,并实现去噪的过程,多次迭代的结果如图 6 所示. 随着迭代次数的增加,圆管内圆拟合圆的精度不断提高,此外图 5 中存在的大量噪点也被有效地去除,如图 6h 所示.

4 试验结果及分析

为了验证所提出的图像处理及圆管内圆特征提取方法的准确性,将所提取的圆与实际圆管内圆进行比较,如图 7 所示,发现提取圆与圆管内圆图像基本吻合,说明文中提出的图像处理和特征提取方法准确可靠. 此外,通过人工测算图像中圆管内圆的半径和圆心位置与文中方法所获得的结果进行对比,按文中方法所获得的圆心位置为(313 pixel, 257 pixel),内圆半径为 205 pixel. 人工测算得到的圆心位置为(310 pixel, 254 pixel),内圆半径为 202 pixel,圆心位置偏差为 $\Delta x = -3$ pixel, $\Delta y = -3$ pixel,半径相对误差为 1.49%.

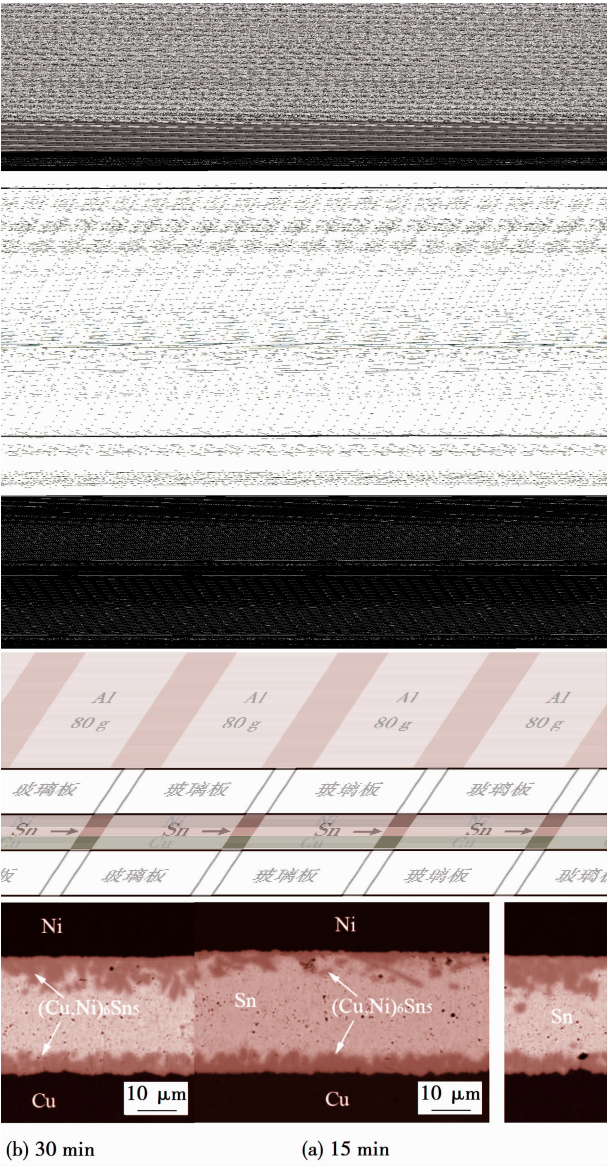


图 6 多次迭代最小二乘法去噪
Fig. 6 Denoising by multi-iterations of least squares

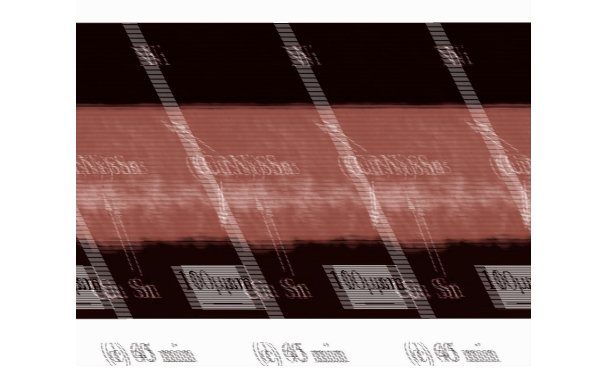


图 7 提取圆与圆管内圆的比较
Fig. 7 Comparison of extracted circle and inside circle of tube

5 结 论

- (1) 建立了用于全自动管板焊接的被动视觉焊接轨迹检测及获取系统,并获得了清晰的管板图像。
- (2) 通过对于光照系统的设计,消除了不同自然光照条件对于试验结果的影响,并为图像特征的提取奠定了基础。
- (3) 根据管-管板的二值化图像特点提出了通过提取圆管内圆特征结合管壁厚度代替直接提取焊接轨迹的方法,并采用多次迭代最小二乘法实现了噪点的有效去除,提高了提取精度。
- (4) 比较人工测算结果与文中提出方法的计算结果,两者图像中圆管内圆的半径和圆心位置计算结果非常接近,其中 x 轴和 y 轴方向圆心位置偏差均为 -3 pixel,半径相对误差为 1.49% 。说明文中提出的图像处理和特征提取方法准确可靠。

参考文献:

[1] 盛大松. 管-管板全自动脉冲钨极氩弧焊工艺的试验与应用[J]. 标准与工艺, 2002(5): 27-29.
Sheng Dasong. The test and application of the fully automatic pulse tungsten argon arc welding process for tube-tube plate[J]. Standards and Processes, 2002(5): 27-29.

[2] 王振民, 张 栋, 李 晋, 等. 换热器管板的全位置自动化焊接工艺[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(5): 100-104.
Wang Zhenmin, Zhang Dong, Li Jin, et al. Whole position automatic welding process of heat exchanger tube plate[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(5): 100-104.

[3] 孟 震. 小孔径自动钨极氩弧焊在管板焊接中的应用[J]. 电焊机, 2011, 41(6): 40-42.
Meng Zhen. Application of small hole automatic GTAW for tube-sheet welding[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(6): 40-42.

[4] 张瑞华, 王 瑶, 王 荣, 等. 管板全位置活性焊接法[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 67-70.
Zhang Ruihua, Wang Yao, Wang Rong, et al. All-position welding with activating fluxes for tube sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 67-70.

[5] 刘永平. 全位置深孔管板焊机机构设计及运动仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[6] 蒋文春, 巩建鸣, 陈 虎, 等. 换热器管子与管板焊接接头残余应力数值模拟[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 1-4.
Jiang Wenchun, Gong Jianming, Chen Hu, et al. Numerical simulation of welding residual stress of tube-to-tube sheet joint in heat exchangers[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(12): 1-4.

作者简介: 金泽石,男,1988 年出生,博士研究生. 主要从事自动化焊接及视觉传感相关方面的研究. 发表论文 3 篇. Email: jinzeshi1989@126.com

通讯作者: 李海超,男,副教授. Email: lihaichao@hit.edu.cn