

基于视觉图像传感的精密脉冲 TIG 焊焊缝跟踪

陈 念， 孙振国， 陈 强

(清华大学，北京 100084)

摘 要： 针对某复杂曲面薄壁不锈钢工件精密脉冲 TIG 焊中的焊缝跟踪问题，本文研究了一种基于视觉传感的高精度、高实时性焊缝跟踪技术。根据脉冲 TIG 焊的工艺特点，该技术通过选择特定波长的滤光片及合理的曝光时刻，采用工业 CCD 摄像机获取可直接分辨出焊缝、熔池和钨极的清晰、放大的焊接区图像。采用 VC 语言设计的图像处理算法，可以快速准确地识别出焊缝中心线，提取钨极偏离焊缝中心线的方向和距离，驱动步进电机调节焊炬位置，实现高精度、高实时性的焊缝跟踪。试验结果表明，该技术的单幅图像处理周期小于 120ms，能实现焊炬运动方向与焊缝偏差角小于 30° 的焊缝跟踪，满足了复杂曲面的薄壁不锈钢工件的精密焊接要求。

关键词： 视觉图像传感；图像处理；焊缝跟踪；脉冲 TIG 焊

中图分类号：TG409 文献标识码：A 文章编号：0253-360X(2001)04-17-04

陈 念

0 序 言

TIG 焊具有热量集中、热影响区小、易于控制对母材的热输入等优点，广泛应用于薄件焊接、全位置焊接等生产实践中。其中的脉冲 TIG 焊工艺具有较低的焊接平均电流和线能量，并且可以通过调节脉冲电流规范参数精确控制电弧能量及其分布获得良好的焊缝成形，因而常用于薄壁工件的焊接。

某复杂曲面工件由数百根管壁厚度仅为 0.33mm 的薄壁不锈钢矩形管盘于锥体胎具上焊接而成(如图 1 所示)，其焊缝是一条螺旋角时刻发生变化的空间螺旋线。工艺要求焊缝窄而浅，成形均匀美观，结构牢固。薄壁管和锥体成形的应力及焊接热变形等因素的存在，使其对变形引起的弧长和电弧位置的变化十分敏感，更易导致焊偏、焊穿或未焊透现象。初步试焊结果表明，该工件的焊接只能采用脉冲 TIG 焊工艺，平均电流小于 30A，其中基值电流小于 10A。为此必须研究合理的高跟踪精度、高动态性能的弧长和焊缝跟踪技术，实现精密、快速的小电流脉冲 TIG 焊接生产。有关弧长跟踪的研究结果详见文献 [1]，本文注重讨论其中的焊缝跟踪问题。

焊缝位置的实时检测是实现高精度、高动态性能的焊缝跟踪前提。目前常用的传感器有电弧式、接触式、电磁式、光电式等，其中视觉传感器因其具

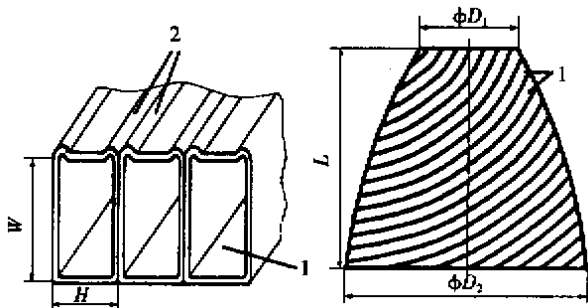


图 1 复杂曲面薄壁不锈钢工件示意图
Fig.1 Schematic diagram of the thin stainless workpiece with complicated curved surface

1. Rectangular pipe; 2. Edges of weld seam

有信息量大、灵敏度高、测量精度高、动态响应特性好、与工件无接触等特点得到了广泛应用。采用辅助光源的结构光法目前应用得最为普遍，但这种视觉传感方法的检测点位于电弧点前方一定距离上，存在相应的前导误差，因而难以实现高精度的焊缝跟踪。近年来，采用工业 CCD 摄像机的视觉传感方法不断涌现，并在 TIG 焊接的熔池形貌检测与实时控制、焊缝跟踪等方面得到了成功应用，但视觉图像中所包含的巨大信息量往往导致图像处理速度很慢，降低了此类方法的实时性 [2,3]。

以研究一种基于视觉传感的高精度、高性能的焊缝跟踪技术为目标，本文建立了一套可直接获取清晰、放大的焊接图像的 CCD 视觉传感系统，提出了一种快速、准确的焊缝识别与跟踪偏差计算算法，很好地解决了图像处理速度问题，并设计了相应的

焊缝跟踪控制策略，完成了对复杂曲面薄壁不锈钢

试件的精密焊接。

1 视觉传感与焊缝跟踪系统

1.1 系统组成

由于工件固定在锥体转胎上 ,焊缝的起点与终点在径向和轴向的变化量都比较大。为保证焊缝控制(及弧长跟踪)的精度 ,本文采用大误差范围内的轨迹控制与小误差范围内的精密跟踪相结合的方案 ,并建立了如图 2 所示的基于视觉传感的精密脉冲 TIC 焊焊缝跟踪系统。

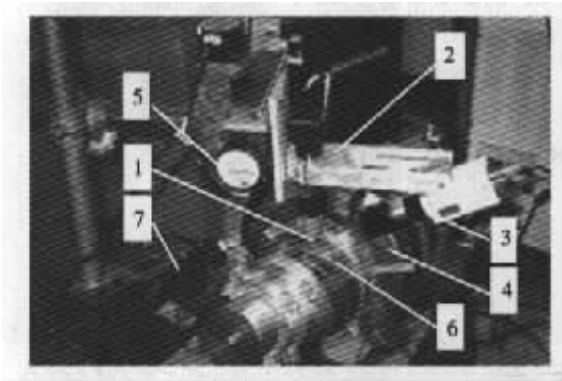


图 2 基于视觉图像传感的焊缝跟踪系统

Fig.2 Seam tracking system based on visual sensor

- 1. Welding torch ; 2. Bracket ; 3. CCD camera ; 4. Axially rotating unit ;
- 5. Welding torch position adjusting unit ; 6. Workpiece to be welded ;
- 7. Horizontally moving unit

该系统具有以下特点。

(1) 工件固定在一个可实现旋转运动的转胎上 ,焊炬及其位姿调整机构安装在一个能相对于工件旋转轴运动的平移运动机构上 ,通过对多轴伺服控制卡的编程 ,分别驱动转胎旋转电机和焊炬平移电机 ,实现焊炬沿螺旋线焊缝在一定误差范围内的轨迹运动。

(2) 焊炬及其位姿调整机构和工件旋转轴保持某种特殊空间关系 ,可以保证焊炬相对工件始终处于平焊位置 ,不仅便于控制焊接规范 ,而且减少了不同焊接位置对视觉图像的影响 ,提高了视觉传感图像的可比性。

(3) CCD 摄像机被置于焊炬的焊接方向上 ,通过支架与焊炬联结 ,并在焊接过程中与焊炬保持相对位置固定 ,可以拍摄到实时焊接过程中熔池及焊缝的图像。

(4) 图像采集卡接收 CCD 摄像机拍摄的模拟图像后 ,经过 A/D 转换成为数字图像 ,由计算机进行实时图像处理。计算机根据图像处理结果 ,驱动焊炬位姿调整机构 ,实时调节焊炬位置 ,实现高精度的焊缝跟踪。

1.2 滤光片及拍图时刻的选择

为避免焊接过程中强弧光对视觉传感的干扰 ,必须选择合适波长的滤光片及合理的拍图时刻。工艺试验表明。

(1) 在脉冲电流峰基值阶段的图像品质存在较大差异 ,其原因是 :在脉冲电流峰值期间拍摄图像时 ,因电弧的弧光太强 ,焊缝信息淹没在弧光之中 ,导致从图像中获得焊缝位置信息的困难 ;而在脉冲电流基值期间进行拍摄图像时 ,电弧的弧光较弱 ,图像特征相对比较明显 ,包含的信息丰富 ,便于后续的图像处理。

(2) 在脉冲电流基值期间 ,不同时刻所拍摄的图像质量也不相同。这是因为作为主动光源的电弧光强在脉冲电流基值期间总是由强转弱地不断变化。针对电弧光强的这一特点 ,应该选择脉冲电流基值期间的某一个电弧光强适中的时刻来拍摄图像。

(3) 峰值电流 42 A ,峰值时间为 50 ms ,基值电流 5 A ,基值时间 80 ms 时 ,采用中心波长为 860 μm 的滤光片 ,在峰值电流过后 50 ms 后 ,可获取清晰、稳定、特征明显的实时焊缝图像。

2 焊缝中心线快速识别算法

典型的视觉传感图像如图 3 所示 ,图像上部是位于熔池前方的工件 ,较亮的两条垂直方向的平行棱线是被电弧光照亮的工件的两条棱 ,焊缝位于两棱之间 ,图像中部较亮的椭圆形区域为熔池 ,在图像的中下部为钨极的端部与电弧。

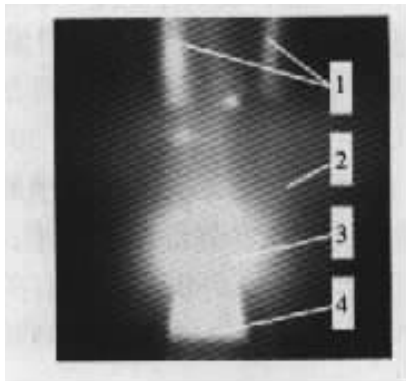


图 3 典型的视觉传感图像

Fig.3 Typical visual image of welding process

- 1. Edges of weld seam ; 2. Weld pool ; 3. Welding arc ;
- 4. Tungsten electrode

由于在 CCD 所拍摄的较小视场范围内 ,可以近似地认为图像中的焊缝中心线是条直线。从图像的特征出发 ,两条棱线的中心线就是焊缝中心线 ,对焊缝中心线的识别可以转换成为对工件棱线的识别。

基于以上思路 , 本文提出了一种快速、准确地识别焊缝中心线的算法 , 其图像处理结果如图 4 所示 , 具体步骤如下。

(1) 区域分割 : 由图 3 可知焊缝位于图像的上部 , 进行图像处理时 , 只需处理包含有效信息的窗口图像如图 4a , 以减少被处理的数据量 , 提高处理速度。

(2) 中值滤波及 Sobel 变换 : 对图像进行中值滤波以去除噪声 , 然后利用 Sobel 变换进行边缘点的提取 , 其结果如图 4b 所示。

(3) 二值化 : 采用 P - tile 法确定阈值 , 二值化后的图像如图 4c 所示。其中白点为边缘点。

(4) 求棱线的直线方程 : 由边缘点检测直线的传统方法如 Hough 变换 , 在图 4c 这类边缘点较多的情况下 , 计算量大 , 处理速度慢。本文提出的直线识别算法原理如下。

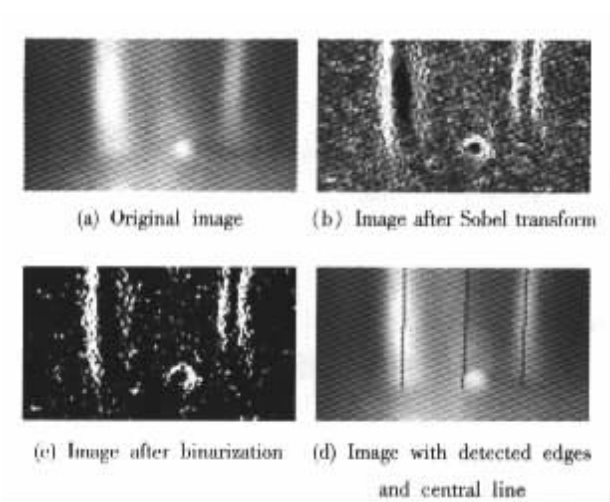


图 4 焊缝中心线快速识别算法的图像处理结果
Fig.4 Processed images of the weld seam 's central line fast detecting algorithm

在对图像进行 Sobel 变换时 , 已知 X 方向的卷积 S_x , Y 方向的卷积 S_y , 那么图像中的每个像素点 , 均有对应的方向角 $\theta = \arctan(S_y/S_x)$, 它表示一次微分时的梯度方向。对所有二值化后的边缘点 , 绘制如图 5a 所示的方向角直方图 (图中的横坐标为方向角 , 范围为 $0 \sim 180^\circ$, 纵坐标为对应不同方向角的边缘点的个数)。由于绝大部分的边缘点位于棱线直线上 , 由图 4c 可知 , 每条棱线的左右各有一对平行的边缘线 , 因此共有 4 条边缘线 , 它们的方向相同。位于边缘线上的边缘点的方向角相等 , 导致图 5a 中曲线存在一个波峰 , 峰值处所对应的方向角为 A , 边缘点的个数为 B , 说明具有 A 方向角的边缘点数在总边缘点数中占最大比例。由上述推理可得 , 方向角 A 就是棱线直线的边缘梯度方向 , 并由正交

关系可计算出棱线直线的斜率。

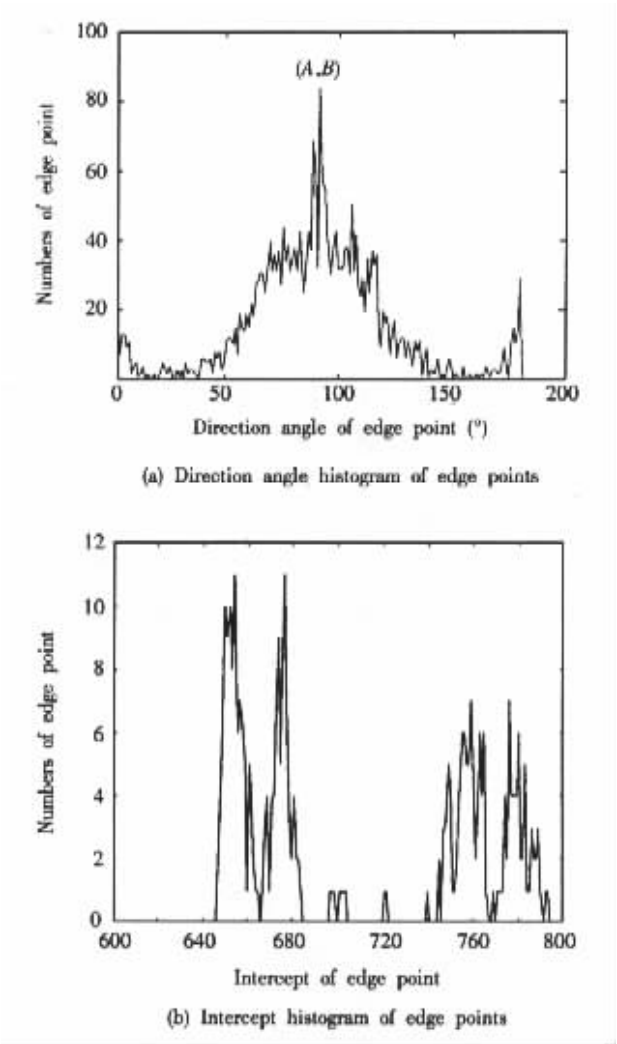


图 5 棱线边缘点的方向角和截距直方图
Fig.5 Histograms of edge points 's direction angle & intercept

设棱线斜率为 K , 对于图 4c 中任意一个边缘点 $P(x_p, x_y)$, 在图像空间上可做一条过 P 点、斜率为 K 的直线 , 直线方程为

$$Y = K(X - x_p) + y_{p0} \tag{1}$$

如果用截距式来表达则为

$$Y = kX + b_p, \tag{2}$$

其中截距为

$$b_p = y_p - kx_{p0} \tag{3}$$

对于图 4c 中的每个边缘点 , 均进行上述操作 , 可计算出一组截距。对这组截距绘制直方图 , 如图 5b 所示 (图中的横坐标为各个边缘点的截距 , 纵坐标为对应不同截距的边缘点的个数)。由于图 4c 中有四条边缘线 , 而位于同一条边缘线上的边缘点的截距是大致相等的 , 所以在图 5b 的曲线中出现四处明显的波峰。由这四处波峰的峰值可求出四条边缘线的截距 , 进而求出棱线的截距。

由所求的两条棱线的斜率和截距可计算出两条棱线的直线方程。

(5)求焊缝中心线方程 :由两条棱线的直线方程可以很方便的求出焊缝中心线的直线方程。

3 焊缝跟踪控制策略

根据求得焊缝中心线的直线方程和当前钨极在图像中的位置 ,可以方便地求出钨极偏离焊缝中心线的偏差量信号 E 和方向信号 D 。当钨极位于焊缝中心线左侧时 , $D = 1$,步进电机正转 ,带动焊炬右移使钨极靠近焊缝中心线 ;反之 ,当钨极位于焊缝中心线右侧时 , $D = 0$,步进电机反转 ,带动焊炬左移使钨极靠近焊缝中心线。本文将步进电机的驱动脉冲信号频率固定 ,通过控制步进电机的使能信号 T_e 的时间长短来确定焊炬移动距离。钨极偏离焊缝中心线的偏差量信号 E 与焊炬移动时间 T_e 之间的对应关系可由下式表示

$$T_e = \begin{cases} 0 & E \leq \epsilon_1 , \\ \alpha(E + M) & \epsilon_1 > E > \epsilon_1 , \\ C & E \leq \epsilon_2 , \end{cases} \quad (4)$$

式中 : ϵ_1 、 ϵ_2 、 C 为常数 ; M 表示与待焊处焊缝中心线的斜率相对应的调整量 , M 的数值可由焊缝中心线的斜率以及焊接速度来决定 ; α 为比例因子 ,用以控制输出纠偏量的幅度。即 :当偏差量小于 ϵ_1 时 ,焊缝跟踪电机不动作 ;当偏差量大于 ϵ_2 时 ,焊缝跟踪电机仅运动一段固定时间 C ,焊炬仅移动一个固定距离 ;偏差量介于二者之间时 ,焊缝跟踪电机动作时间正比于偏差量。

4 工艺试验

工艺实验结果表明 ,采用本文提出的焊缝中心线快速识别算法 ,可以在 120ms 内完成图像采集、焊缝中心线识别、焊炬偏差计算及控制量输出等 ;所研制的基于视觉传感的精密焊缝跟踪系统运行稳定可靠 ,实时性好 ,抗干扰能力强 ,能实现焊炬运动方

向与焊缝偏差角小于 30°的焊缝跟踪。将该系统与弧长跟踪系统相配合 ,成功地进行了复杂曲面薄壁不锈钢试件的精密焊接(如图 6 所示)。其焊缝保护良好 ,焊缝宽度均匀 ,外形美观 ,达到了焊接工艺要求。

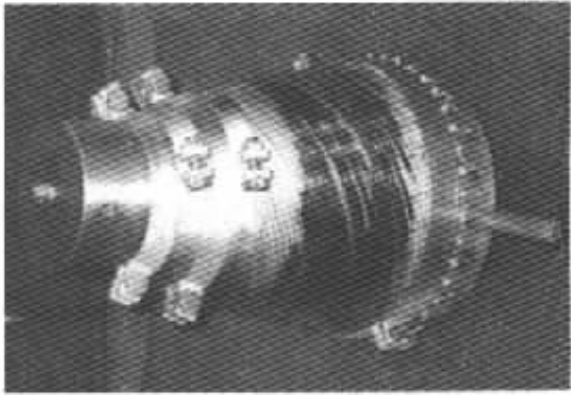


图 6 焊后的复杂曲面不锈钢薄壁工件
Fig.6 Welded thin stainless steel workpiece with complicated curved surface

5 结 论

- (1)建立了一套可以同时拍摄焊接电弧、熔池、焊缝的视觉传感系统。
- (2)提出一种焊缝中心线的快速识别算法 ,提高了图像处理的速度 ,图像处理周期小于 120ms ,满足实时焊缝跟踪的要求。
- (3)研制的跟踪系统工作稳定可靠 ,跟踪精度高 ,适用于具有复杂曲面工件的精密焊缝跟踪。

参考文献 :

[1] 孙振国、陈念、陈强.精密脉冲 TIG 焊中的弧长跟踪技术[J].焊接学报 ,2001(1) 4548.

[2] 何景山、杨春利、林三宝 ,等.无辅助光源图像法 TIG 焊焊缝跟踪传感系统[J].焊接学报 ,2000 ,21(1) 3740.

[3] 黄石生、高向东、俞时伟.一种智能型焊缝跟踪系统的研制[J].机械工程学报 ,1999 ,35(6) 3437.

作者简介 : 陈 念 ,男 ,1974 年 11 月出生。1997 年毕业于清华大学机械工程系 ,获学士学位。现为清华大学机械工程系材料加工工程专业博士研究生。主要研究方向为弧焊过程传感技术、机器人智能控制技术等。发表论文 3 篇。

(编辑 : 闫秀荣)