

# 海底管道干式高压焊接跟踪轨迹的识别

焦向东<sup>1</sup>, 黄松涛<sup>1</sup>, 周灿丰<sup>1</sup>, 薛 龙<sup>1</sup>, 房晓明<sup>2</sup>, 章怡圣<sup>2</sup>

(1. 北京石油化工学院 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617;

2. 中国海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

**摘 要:** 干式高压 TIG 焊接法是海底输油(气)破损管道修复所用的重要的、焊接质量较高的连接方法, 而自动化焊接又是解决潜水员焊接效率低下的有效途径, 焊缝跟踪技术则是保证焊接过程正常进行和焊缝质量的关键技术。设计了能克服环境压力影响的 CCD 图像摄取装置, 研究了一套焊缝跟踪路径识别算法。运用直方图均衡化方法强化坡口与非坡口的差别, 增加焊缝图像的理解性。提出了以图像灰度最低值拟合合成的曲线将整个图像分为两个部分的图像分解法, 提高了图像识别目标的焊缝坡口部分所占的比重, 有利于二值化阈值的选取。采用基于数学形态学的二值图像边界识别方法分离出焊缝边界, 用 Hough 变换法确定坡口边线位置, 最后用图像分解逆过程经合并后识别出坡口所在的位置。所提出的方法组合后抗干扰能力强, 计算速度快, 为进一步实现自动化焊接奠定了基础。

**关键词:** 干式高压焊接; 边缘检测; 焊缝识别; 跟踪

**中图分类号:** TG409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)01-001-04



焦向东

## 0 序 言

国内的石油资源量并不丰富。世界人均的石油可采资源量是 68 t, 而国内人均 12 t; 天然气的世界平均水平是 70 000 m<sup>3</sup>, 国内的人均水平只有 10 000 m<sup>3</sup>。针对这种情况, 国务院提出了“调整东部, 发展西部, 加快海上”的油气开发总方针, 海上石油开发越来越占据更大比重<sup>[1,2]</sup>。管道输送是海上油气运输的重要手段。国内海洋结构的情况是, 在数量逐年增多的同时, 部分结构的在役时间也逐渐接近其设计寿命, 因而维修问题也就更加突出, 比如, 渤海海域最早铺设的埕北油田海底管道已运行近 20 年, 进入 20 世纪 90 年代后, 损伤事故逐年增多, 仅 2002 年中国海洋石油总公司就发生了 4 起海底管道损伤事故。目前国内对于海底破损管道的修复基本依赖于国外的大公司, 成本很高, 修复及时性不好。作者承担的国家“十五”863 重大项目之水下干式高压焊接的目标就是研制一套海底输油双层管自动化焊接设备和工艺。潜水员将设备空装在水下干式舱中, 焊工在船上遥控焊接, 二人配合完成焊接。

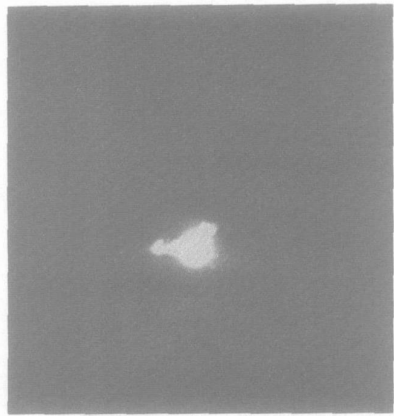
受海底干式舱中工况和工作条件的限制, 焊接坡口的制备和组对质量无法保证达到陆上焊接所需的要求, 因此对焊接自动化的核心工作即焊缝跟踪的研究具有十分重要的意义。由于视觉传感器具有获取焊接区域信息丰富、智能化程度高、能适应不同接头等优点<sup>[3,4]</sup>, 在双层管自动焊机中使用了 CCD 摄像头作为视觉传感器。一切工作的出发点是能准确获取焊缝轨迹。作者介绍了海底输油双层管自动化焊接设备跟踪系统的图像传感与处理技术。

## 1 焊缝图像的获取

经试验证实, CCD 摄像头可以直接置于环境压力不高于 0.6 MPa 的干式舱中使用(CCD 摄像头参数: 分辨率 752×582, 像素大小 8.6 μm×8.3 μm; 焦距 4 mm; 滤光镜参数: 中心波长 940 nm, 半波带宽 10.6 nm, 峰值透射率 85 %; 图像获取过程中光圈调节量不变), 但是随着压力的增加, 电弧亮度增加, 清晰度变差。试验结果如图 1 所示, 图 1a 为 0.2 MPa 时的电弧图像, 图 1b 为 0.6 MPa 时的电弧图像。为确保高压环境之下清晰的电弧形状和焊接轨迹的图像, 必须在线调节控制器, 调节电动变焦镜头光圈和焦距, 因此选用了线控可变 CCD 镜头, 满足了使用要求。

收稿日期: 2005-12-20

基金项目: 国家“十五”863 高技术研究发展计划资助项目“水下干式管道维修系统”(2002AA602012); 北京市人才强教计划之拔尖创新人才资助计划项目



(a) 压力 0.2 MPa



(b) 压力 0.6 MPa

图 1 不同环境压力下的 TIG 焊接电弧形貌  
Fig. 1 TIG welding arc at different ambient pressures

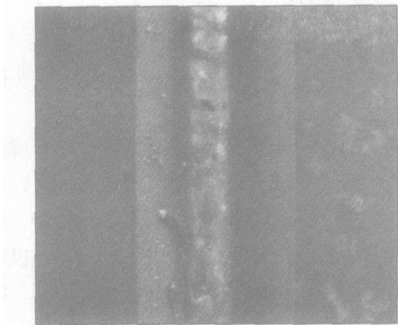
2 焊缝图像的预处理

均匀量化的自然图像的灰度直方图通常在低值灰度区间上频率较大,使得图像中较暗区域中的细节常常看不清楚。为了使图像清晰,可将图像的灰度范围拉开,并且让灰度频率较小的灰度级变大,在较大的动态范围内趋于一致。通过累计分布函数(cumulative distribution function, CDF)将灰度  $S_k$  的分布转换为  $t_k$  的均匀分布,即

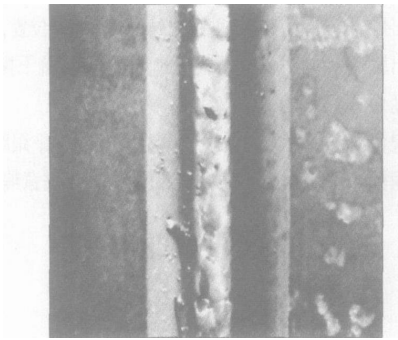
$$t_k = EH(S_k) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n} = \sum_{i=0}^k p_s(S_i), \quad k=0, 1, \dots, L-1.$$

式中:  $EH(S_k)$  是直方图增强函数;  $S_k$  为图像  $f(x, y)$  的第  $k$  级灰度值  $0 \leq S_k \leq 1$ ;  $n_k$  是  $f(x, y)$  中具有灰度值  $S_k$  象素的个数;  $n$  是图像中像素总数。这里  $p_s(S_k)$  代表第  $k$  个灰度级出现的概率。根据原图像直方可直接算出直方图均衡化后各像素的灰度值。当然实际中还要对  $t_k$  取整以满足数字图像的要求。反变换可写成  $S_k = EH^{-1}(t_k)$ ,  $0 \leq t_k \leq 1$ 。这样就保证了原图各灰度级在变换前后仍保持从黑到白(或从白到黑)的排列次序,变换前后灰度值动态范围的一致性。

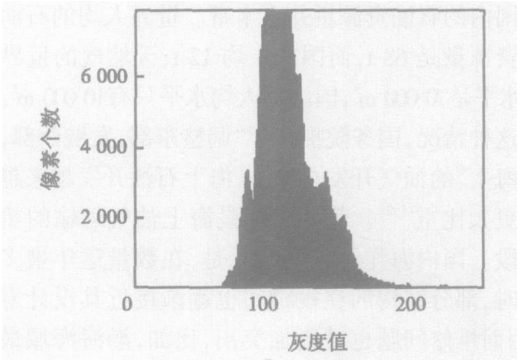
图 2 是灰度直方图均衡化增强的试验结果。图 2a 是进行灰度直方图增强的维纳自适应滤波原始图像;图 2b 是用 64 个灰度级进行直方图均衡化增强后的结果,原始图像的灰度级是 256;图 2c 是图 2a 所对应的灰度直方图;图 2d 是图 2b 所对应的



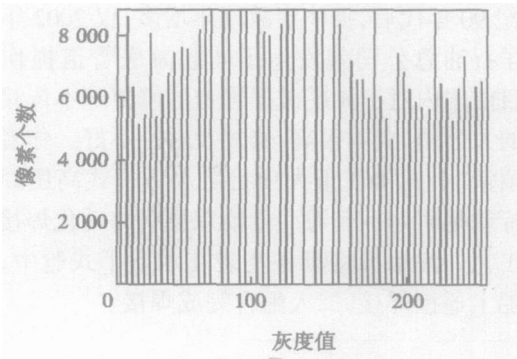
(a) 原始图像



(b) 增强后图像



(c) 原始图像灰度值



(d) 增强后图像灰度值

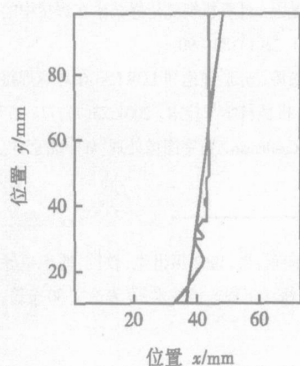
图 2 灰度直方图均衡化增强的试验结果图  
Fig. 2 Result of equalizing enhancement of histogram

灰度直方图。从以上试验结果得知,经过灰度直方图均衡化增强的图像与原图相比,非坡口部分与坡口部分比较有了明显的差别,具有更强的理解性。

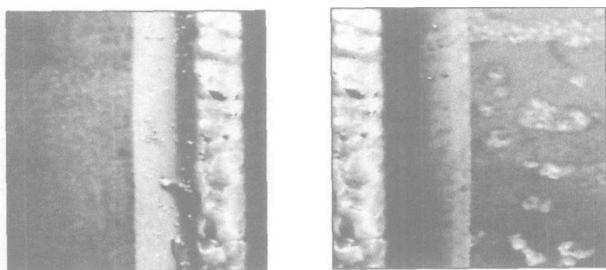
### 3 焊缝图像的分解

经过直方图均衡化增强之后的图像具有较强的理解性,但是在整幅图的基础上要想通过图像分割的方法得到坡口的具体位置还存在一定困难,至少计算时间很长。灰度图的坡口部分的灰度值相对比非坡口地方低。通过 LOWESS<sup>[9]</sup> 拟合直线方法把图像坡口部分的灰度值最低点拟合成一条直线,将图像整体分成两块。

图3中,图3a是图2b中的灰度值最低点经过 LOWESS 方法平滑后的点形成的曲线,直线是平滑后点拟合成的直线;图3b是图像分解后的左半部分,图3c是图像分解后的右半部分。图像分解虽然在一定程度上增加了计算工作量,但是图像分解不但提高了作为图像识别目标的焊缝坡口在图像背景中所占的比率,而且使得各层次灰度在图像所在的比例比较均衡,图像分解为以后灰度图像的二值化阈值的正确选取和焊缝边缘的识别创造了条件。从图3图像分解的结果图中看出,在分解后的两部分图中坡口部分与非坡口的区别显著加强。对求取坡口边缘有很好的辅助作用。



(a) 图2b经 LOWESS 变换结果



(b) 图像分解后左半部

(c) 图像分解后右半部

图3 图像分解的试验结果图

Fig. 3 Decomposing result of weld image

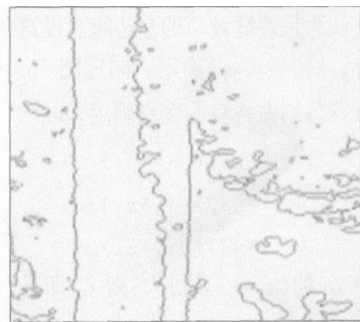
### 4 焊缝边缘的提取

在二值化的基础上,采用基于数学形态学的二值图像边界识别方法识别边界。基于数学形态学的二值图像边界识别确定边界时可以指定采用4邻域连接定义,边界元素必须满足以下两个条件:该元素值为1,该元素邻域中至少有一个元素值为0。

图4是焊缝灰度图边界检测的试验结果图,可以看出,二值图经过边界检测后基本上能把焊缝坡口轮廓从背景中分离出来,最后应用 Hough 变换法,对于左右两半部分的图像分别在  $(r, \theta)$  空间取计数累加器最大的三个值,变换到  $(x, y)$  空间得到三条直线。



(a) 左半部边界检测结果



(b) 右半部边界检测结果

图4 二值图边界检测的试验结果图

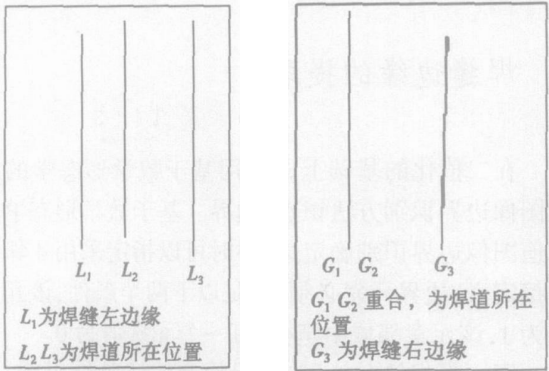
Fig. 4 Edge detecting result of threshold image

如图5a所示,靠左的一条直线认为是焊缝的左边缘,其余的两条线可以认为是焊道所在的位置;图5b靠右的一条直线认为是焊缝的右边缘,其余的两条线( $G_1, G_2$  二线重合)可以认为是焊道所在的位置。图5a中三条直线的方程分别由各自两端点确定,即

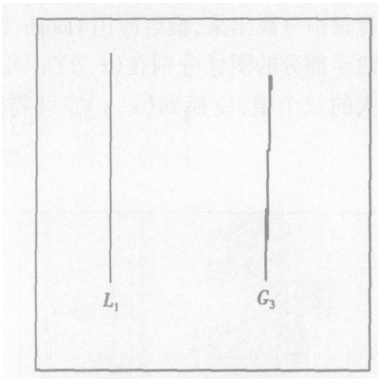
$$L_1: (x_{11}, y_{11}), (x_{12}, y_{12}),$$

$$L_2: (x_{21}, y_{21}), (x_{22}, y_{22}),$$

$$L_3: (x_{31}, y_{31}), (x_{32}, y_{32}).$$



(a) 左半部分图像边缘提取结果 (b) 右半部分图像边缘提取结果



(c) 合并后图像边缘提取结果

图 5 焊缝边缘提取试验结果图

Fig. 5 Result of feature extraction of weld

如果  $L_i$  的  $(x_{i1} + x_{i2})$  最小, 则  $L_i$  即是最靠左的一条直线认为是焊缝坡口的左边缘。设这条直线由端点  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  确定。同理图 5b 中的三条直线的方程分别由各自两 endpoints 确定, 即

$$\begin{aligned} G_1: & (x_{11}, y_{11}), (x_{12}, y_{12}), \\ G_2: & (x_{21}, y_{21}), (x_{22}, y_{22}), \\ G_3: & (x_{31}, y_{31}), (x_{32}, y_{32}). \end{aligned}$$

如果  $G_i$  的  $(x_{i1} + x_{i2})$  最大, 则  $G_i$  即是右边图像中最靠右的一条直线, 认为是焊缝坡口的右边缘, 设这条直线由端点  $(x_3, y_3)$  和  $(x_4, y_4)$  确定。因为进行焊缝跟踪, 只需找出焊缝所在位置, 所以对其余的两

条直线可以忽略不计, 况且它们大多时候还接近于重合。从焊缝边缘提取的结果图可以看出, Hough 变换去除了背景噪声。最后用图像分解的逆过程, 把左右两部分图像合并起来, 就能准确地得到具体的已焊坡口所在位置, 为机器人焊缝跟踪奠定了基础。合并后的图像如图 5c 所示。

5 结 论

研究的焊接路径识别算法成功应用在建成的海底管道干式高压焊接试验系统中, 该系统是个密闭的干式试验舱, 平板及管道焊接试验均在密闭环境中进行, 跟踪极其重要。试验证明, 提出的方法不仅能准确地求出已焊坡口所在位置, 而且抗干扰能力强, 实时性好, 圆满完成了依托的 863 项目规定的海底管道焊接工艺试验, 是比较实用的跟踪路径识别方法。

参考文献:

[ 1 ] 秦 萍. 中国海洋石油将走向深水—访海洋石油工程专家曾恒一[ J ]. 中国船检, 2004, 6: 64—67.  
[ 2 ] 曾恒一. 我国造船工业的重要领域—海洋石油工程[ J ]. 船舶工程, 2005 27(s): 30—33.  
[ 3 ] 李国进, 王国荣, 钟继光, 等. 水下焊缝自动跟踪路径的识别[ J ]. 焊接学报, 2005, 26(3): 58—62.  
[ 4 ] 陈 强, 孙振国. 计算机视觉传感技术在焊接中的应用[ J ]. 焊接学报, 2001, 22(1): 83—90.  
[ 5 ] 焦向东, 黄松涛. 分形理论和 LOWESS 在球罐焊接坡口检测中的应用[ J ]. 机械科学与技术, 2004, 23(7): 774—776.  
[ 6 ] Kenneth R. Castleman. 数字图像处理[ M ]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

作者简介: 焦向东, 男, 1962 年出生, 教授, 博士生导师。研究方向为焊接自动化、海洋工程连接技术, 发表论文 30 余篇, 获省部级科学技术奖 3 项。

Email: jiaoxiangdong@bipit.edu.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

### Route recognition algorithm in hyperbaric subsea pipe welding

JIAO Xiang-dong<sup>1</sup>, HUANG Song-tao<sup>1</sup>, ZHOU Can-feng<sup>1</sup>, XUE Long<sup>1</sup>, FANG Xiao-ming<sup>2</sup>, ZHANG Yi-sheng<sup>2</sup> (1. Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. China offshore oil engineering, Tianjin 300452, China). p1—4

**Abstract:** The hyperbaric TIG welding is the most quality reliable joining method for damaged underwater pipeline. The automatic welding is the most effective way to improve the welding efficiency. The welding seam tracking algorithm is the key technology to ensure the working procedure and its quality. The specially designed CCD system is capable of working in high pressure chamber. A set of route detecting algorithm was developed. To better understanding the weld image, the histogram equalization method was used aiming at enlarging the difference between groove and other area. An outstanding image segmentation method was proposed and used to increase the target ratio and was better to the threshold selecting. A binary image edge detecting algorithm based on morphology was used to separate the welding edge and then the Hough transform was used to pick the tracking route accurately.

**Key words:** hyperbaric welding; edge detection; welding seam recognition; seam tracking

### Surface nanocrystallization of 0Cr18Ni9Ti steel welded joints and its stress corroding resistance

WANG Zhi-ping<sup>1</sup>, WANG Ji-xiao<sup>2</sup>, JI Zhao-hui<sup>1</sup>, LI Na<sup>1</sup> (1. College of Sciences, Civil Aviation University of China, Tian-jin 300300, China; 2. Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China). p5—8

**Abstract:** A nanocrystalline surface layer was obtained on surface 0Cr18Ni9Ti steel welded joint with a supersonic particles bombarding (SSPB) technology. The microstructure of the welded joint surface was analyzed by means of optical microscope and TEM. The property of the welded joint to resist stress corrosion of H<sub>2</sub>S was studied by constant load technique as well. Experimental results showed that after the SSPB treatment, the initial coarse-grained structure in the top layer was refined to the ultra-fine nanocrystal and becomes more homogeneous. The obtained mean grain size in the surface layer within 60 μm is about 10.4 nm. At the same time, the ability of the welded joint to resist stress corrosion of H<sub>2</sub>S is enhanced remarkably after the SSPB treatment and no cracks are found after 300 h constant load testing.

**Key words:** supersonic particles bombarding; surface nanocrystallization; H<sub>2</sub>S stress corrosion resistance

### Modeling and realizing of system software to monitoring and controlling spot welding process and quality

ZHANG Peng-

xian, CHEN Jian-hong, XIE Dong, MA Yue-zhou (Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p9—12

**Abstract:** A method is proposed to design the computer software that is used to assure joint quality of resistant spot welding based on parameters monitoring and information processing. First, the requirement is analyzed for the monitoring and controlling system of the process and quality in the spot welding. And then software model of the system is set up by mean of Unified Modeling Language. Secondly, according to the software model of the system and Rational Unified Process method used for software project design, a special software of the system is developed by Visual Basic 6.0 language. At last, application and test of the system shows that the performance of system is steady and the structure of software is logical. At the same time, the period of software exploitation is shortened and the software is good extensible.

**Key words:** resistance spot welding quality; assurance software modeling; rational unified process; unified modeling language

### Numerical simulation and analysis of heat convection in electrode cooling of spot welding

LUO Ai-hui, ZHANG Xu-qiang, ZHANG Yan-song, CHEN Guan-long (BMTC, Mechanical and Power Engineering School, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p13—16, 20

**Abstract:** Resistance spot welding is a widely used jointing technique during the process of automobile body assembly. The efficiency of spot welding process under continuous work conditions is depended on the electrode life which is related with the effect of water cooling. The fluent flow of cooling water in the cooling cavity has been simulated by using numerical simulation method. Analysis about heat convection and cooling effect of electrode have been performed as the base for the further researches of the increasing of cooling effect and the extending of electrode life.

**Key words:** resistance spot welding; numerical simulation; fluent flow; heat convection

### Forming characters of Fe<sub>30</sub>P<sub>13</sub>C<sub>7</sub> amorphous coating fabricated by bar material plasma spraying

LEI A-li, TANG Wen-hao, FENG La-jun (School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). p17—20

**Abstract:** The micro-structures of Fe<sub>30</sub>P<sub>13</sub>C<sub>7</sub> amorphous coating by bar material plasma spraying is analyzed by XRD-7000 X ray diffraction instrument. The differential thermal analyzer curve is tested by CRY-2P differential thermal analyzer, and crystallization temperature is analyzed, and microhardness of the coating is tested by