DOI: 10.3901/JME.2019.17.014

基于焊缝熔透检测的机器人深熔 K-TIG 焊接系统*

张抱日^{1,2} 顾盛勇^{1,2} 石永华^{1,2}

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510641;

2. 广东省特种焊接技术与装备工程技术研究中心 广州 510640)

摘要: 开发了一套基于熔透检测的机器人深熔锁孔非熔化极惰性气体保护焊接(Keyhole tungsten inert gas, K-TIG)系统, 实现焊接高度(Contact tip-to-work distance, CTWD)自动调节与熔透状态的在线检测。利用电弧电压与焊接高度的对应关系, 通过弧压传感器实时采集电弧电压信号并换算成焊接高度值, 然后将实际高度值与预设高度值之间的差值经由过程控制对象连接与嵌入协议(OLE for process control, OPC)通信系统反馈给机器人控制系统, 从而控制机器人实现焊接高度的自动调节。同时, 构建了熔透检测系统, 使用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机采集熔池与小孔图像, 从中提取熔池-小孔特征, 并建立熔池-小孔特征与熔透状态之间的相关性, 在此基础上建立识别熔透状态的反向传播(back propagation, BP)神经网络, 实现不同焊接高度下熔透状态的间接检测, 最后根据该检测结果得到最佳的焊接高度。经过试验验证, 整个系统可靠稳定, 能准确检测焊缝的熔透程度, 并实现焊接高度自动调节, 从而提高了焊接质量。

关键词: 机器人焊接; K-TIG 焊; 焊接高度控制; 熔透检测

中图分类号: TG156

Robotic Deep Penetration K-TIG Welding System Based on Weld Penetration Detection

ZHANG Baori^{1,2} GU Shengyong^{1,2} SHI Yonghua^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641;

2. Guangdong Provincial Engineering Research Center for Special Welding Technology and Equipment, Guangzhou 510640)

Abstract: A deep penetration K-TIG welding system based on penetration detection is developed to realize the automatic adjustment of the contact tip-to-work distance(CTWD) and the on-line detection of the penetration state. Based on the corresponding relationship between the arc voltage and the CTWD, the arc voltage signal collected by the arc voltage sensor in real time is converted into the welding height value. Then, the difference between the actual height value and the pre-set height value is fed back to the robot control system through the OLE for process control(OPC) communication system, so that the robot can realize the automatic adjustment of the welding height. Besides, a penetration detection system is constructed. A charge coupled device(CCD) camera is used to collect the images of the molten pool and key-hole, whose characteristics are extracted. Then the correlation between the pool-hole characteristics and the penetration state is established. Based on this, a back propagation(BP) neural network for identifying the penetration state is established to realize the indirect detection of the penetration state under different welding heights, and finally the optimal welding height is obtained according to the detection result. After testing, the whole system is proved to be reliable and stable, and can accurately detect the penetration state of the weld, realizing the automatic adjustment of the welding height which improves the welding quality.

Key words: robotic welding; K-TIG welding; welding height control; online welding penetration detection

0 前言

深熔锁孔非熔化极惰性气体保护焊接(Keyhole

tungsten inert gas, K-TIG)是一种高效的焊接技术, 利用大电流产生的电弧压力在熔池中形成锁孔, 可不坡口地对中厚板实施对接焊、单面焊双面成形、一道焊透, 无须在背面进行清根重焊。由于其免除了焊丝的填充, 同时又无须开坡口, 相比于传统的非熔化极惰性气体保护焊接(Tungsten inert gas, TIG), 具有效率高、成本低的优点。而实现机器人

* 广东省科技计划(2015B010919005)、国家自然科学基金(51374111)和广州市科技规划(201604046026)资助项目。20180923 收到初稿, 20190303 收到修改稿

深熔 K-TIG 焊接,可进一步提高焊接效率和自动化,具有很大的应用前景和研究意义。

由于深熔 K-TIG 焊接是对厚度较大的工件进行单道焊接双面成形,对于焊接质量的保证显得尤为重要。目前,关于 K-TIG 焊接自动化的研究停留在对焊枪的运动控制上;至于焊接质量的检测,一般是在焊后对工件进行切样,通过分析焊缝横截面处的熔透程度来调整焊接参数,但该方法步骤繁杂,极大地降低了焊接效率。因此,实现焊接质量在线检测具有重要意义。

目前对焊接质量的检测已有相关研究: 熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)焊接质量的统计分析测试^[1]与熔透分析预测^[2]、基于超声与熵模型^[3]和基于神经网络电位移信号^[4]的点焊质量检测。也有研究运用智能技术进行机械状态检测^[5]、开发摩擦焊接质量检测工具^[6]。张勇等^[7]研究基于声发射的裂纹神经网络检测。张朴等^[8]对激光焊接中蓝紫光、红外光和声波信号进行收集,利用神经网络算法进行数据融合,得到焊接质量结果。还有学者提出以焊接电流与电弧电压作为评估焊接质量的信号^[9]、探究高速对电弧和焊池的影响^[10]。焊接过程中受到环境中很多因素的影响,对于声、光、热的检测无疑会增加焊接质量检测的误差,同时多种传感器设备的使用提高了焊接成本、占用了较大空间。对于深熔 K-TIG 焊接,随着焊接参数的改变会得到不同焊透程度的焊缝,同时焊接中熔池与小孔的形态也相应改变。因此本研究中,搭建一个基于熔透在线检测的机器人深熔 K-TIG 焊接系统,实现焊接高度自动调节,同时在线检测焊缝熔透程度,有助于确定最佳的焊接高度,使焊接参数的选择过程中无须进行烦琐的质量检测试验,提高控制精度的同时大大减少试验周期,提高焊接效率的同时保证了焊接质量。

1 机器人深熔 K-TIG 焊接系统

图 1 为所研制的基于焊缝熔透检测的机器人 K-TIG 焊接系统。系统分为: 焊枪、深熔 K-TIG 焊机、电弧电压传感器、A/D 转换器、工控机、KUKA 机器人、机器人控制柜和 CCD 相机等部分。

1.1 机器人高度控制

在焊接过程中,系统的控制以 t 作为调整周期,在一个调整周期 t 内,电弧电压传感器采集电弧的实时电压值,并将数据经 A/D 转换后传输到工控机;电弧电压信号经换算成为焊接高度,然后将所得实际高度与预设的高度值进行比较,得到高度方向上

图 1 机器人自动焊接系统示意图

的偏差 δ_0 , 利用该偏差实时计算出机器人在该调整周期内需要运动的目标点 (x, y) 以及对应的速度 v 。则在一个调整周期 t 内, 设 v_y 为高度方向上速度, δ_0 为周期开始时的高度偏差, 则高度偏差 δ 表达式为

$$\delta = \delta_0 - \int_0^t v_y dt \quad (1)$$

为了避免当 δ 太小的时候机器人末端位置频繁调整导致运动产生振荡, 采用区间分级调节, 当 δ 在允许区间内的时候, 机器人不进行调节; 当 δ 足够大的时候, 则根据 δ 的大小来调节机器人运动速度

$$v_y = \begin{cases} 0 & |\delta_0| \in [0, a] \\ k\delta & |\delta_0| \notin [0, a] \end{cases} \quad (2)$$

结合式(1)、(2), 可得

$$v_y = \exp(-kt + \ln k\delta_0) \quad (3)$$

设 v_x 为水平方向上速度, 即设定的焊接速度, 得到机器人末端总速度

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (4)$$

可得目标点坐标

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t \\ y = y_0 + \int_0^t v_y dt \end{cases} \quad (5)$$

则在一个调整周期内, 机器人末端的运动可表示为, 从上一次调整的终点 (x_0, y_0) 作为起始点, 以 v 为速度运动到 (x, y) 。当调整周期结束后, 则重新检测电弧电压信号, 进而计算高度偏差, 进入下一个调整周期。如此循环, 实现焊接高度的机器人反馈控制。

1.2 基于 OPC 的数据交互

然后将这些参数传输到机器人控制柜中, 首先在工控机中的 OPC 客户端与机器人控制柜中的 OPC 服务器之间建立连接, 客户端在同一网段中通过 IP 地址识别并发送请求, 之后服务器会返还信息, 从而触发建立数据接受缓冲区, 该缓冲区宽度设定为 2 048 字节, 用于对数据流的暂时储存。将目标点 (x, y) 以及对应的速度 v 以 XML 格式封装:

发送方信息(地址信息、端口信息等)与接收方属性信息放置在 XML 信息头上,将所请求的参数变量名赋值给 XML 树结构中的子节点中,形成 SOAP 协议文件发送到 OPC 服务器中,改变相应的参数值。此时服务器中端的改变触发功能生效,会返回所改变参数的状态信息;而客户端在发送请求之后通过等待挂起来接收服务器返回信号,经测试 KUKA 机器人的响应比工控机要慢,工控机客户端在延迟 0.1 s 后发送请求能实现两者的同步。通过此通讯方式,可以实时传送机器人运动参数,同时也能检测到机器人末端的实时位置,从而控制机器人完成高度方向上自动控制的焊接过程。

1.3 熔透检测模块

在机器人的末端位置安装有深熔 K-TIG 焊枪,CCD 摄像机通过夹具固定在焊枪后方。在焊接开始后,焊枪沿着焊缝向前方运动,由 CCD 相机采集熔池与小孔区域的图像,并将采集到的小图像传输到工控机;工控机通过图像处理方法得到熔池与小孔的特征参数,并通过 BP 神经网络推测焊缝的熔透程度。根据所检测的熔透程度及时调整焊接高度的预设值,以达到最佳的自动焊接效果。

2 熔池-小孔特征提取算法

深熔 K-TIG 焊接过程中,电弧产生高温将母材融化成熔池,而电弧贯穿焊件形成小孔。对熔池与小孔形态进行分析,能反映焊接质量,因此可以通过 CCD 相机采集焊枪后方的熔池图像,如图 2 所示。

图 2 高效深熔锁孔 TIG 焊熔池与电弧入口图像

由于熔池区域灰度值较低而电弧区域灰度值很高,一般的分割算法不能有效地将两部分同时分离。因此,本文分别对熔池区域和小孔区域采用不同处理方法求出各自边缘轮廓曲线,最终提取熔池与小

孔入口几何参数特征,流程图如图 3 所示。

图 3 熔池与小孔入口图像处理流程

2.1 图像预处理

为了获取较为清晰且层次明显的图像,本文首先对图像使用中值滤波^[11]方法进行图像去噪,然后进行分段灰度变换的图像增强操作。图 4 表示经过中值滤波以及灰度变换处理后的图像。

图 4 预处理后熔池、小孔图像

2.2 熔池特征提取

CCD 相机与焊枪的相对位置不变,熔池在相机视场中的位置基本不变;同时,熔池形状类似椭圆,因此,可以在图像上截取三个固定位置的矩形窗口为待处理区域,分别位于熔池左、右、下方,利用该区域内信息便可将熔池边缘拟合出来。对区域内使用 Canny 算法处理后,三个区域中不可避免地产生了较多伪边缘。本文采用统计像素点方法得到熔池边缘,从而排除伪边缘的干扰,如图 5 所示。对熔池边缘采用椭圆方程^[12]进行拟合,如图 6 所示,求取椭圆长短轴,并定义短轴 a 为熔池宽度 W_1 ,长半轴 b 为熔池半长 L_1 ,均为熔池特征参数。

图 5 局部区域熔池边缘检测图像处理

图6 椭圆拟合结果与熔池特征参数

2.3 小孔特征提取

小孔在相机视场中的位置也是在一个固定区域内, 因此可以先将小孔所在区域分割出来, 然后根据图像灰度分布特点, 选择合适的阈值对小孔图像进行二值化处理, 所得图像如图 7a 所示。利用最大连通域分离出中心区域, 该区域实际上是电弧与小孔区域重叠的图像, 如图 7b、7c 所示。经过 Canny^[13] 算法得到中心区域的边缘, 如图 7d 表示。

图7 小孔边缘提取

中心区域分为上下两部分, 上半部分是电弧, 下半部分是小孔, 如图 8 所示。为了从其中提取出小孔的特征参数, 对图像区域进行逐行扫描, 记录水平方向上间距最大的两点, 在图中标记为 A 、 B 两点; 记录竖直方向上最低点, 图中标记为 C 点, 过 C 点作竖直线交 AB 于 O 点。曲线 ACB 可以近似表

图8 小孔特征参数

示小孔边缘的一半, 另一边由于电弧阻挡而不易检测。定义线段 AB 长度为小孔宽度 W_2 , OC 为小孔半长 L_2 , 均为小孔特征参数。

3 基于 BP 神经网络的焊缝熔透检测

对焊接质量最直观的衡量参数就是焊缝处的缝宽与熔深, 对缝宽-熔深的检测即是对焊接质量的检测^[14]。经研究, 在一定的焊接参数情况下, 熔池-小孔具有相对稳定的状态, 焊缝也具有稳定的缝宽-熔深。而随着焊接参数的改变, 熔池-小孔与缝宽-熔深的特征参数都会有规律地同步变化, 如图 9 所示。

图9 不同焊接参数下熔池-小孔特征与熔透程度

由分析可知, 焊件的焊透程度, 可以通过分析熔池-小孔的特征参数来得知。因此, 可以建立一个描述二者之间规律的模型, 通过输入熔池-小孔特征参数, 来间接推算出焊件是否被焊透, 从而实现焊接质量的检测。本文采用 BP 神经网络作为焊接质量推测模型^[15-17], 选择高效深熔锁孔 TIG 焊在不同的焊接工艺参数下得到的具体试验数据, 以熔池宽度 W_1 、熔池半长 L_1 、小孔宽度 W_2 和小孔半长 L_2 作为输入量。以焊缝熔透程度作为输出量, 建立训练样本。BP 神经网络结构如图 10 所示。

图 10 神经网络结构图

BP 神经网络将 Sigmoid 函数作为隐含层的激活函数，而线性函数则作为输入层和输出层的激活函数。其他设置如下所述。

(1) 训练样本的前处理操作：采用最大最小法将所有数据用过归一化方法转换到 \$[0,1]\$ 之间的数值^[12]，消除各维数之间的数量级差别

$$x'_k = \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中，\$x_{\max}\$ 与 \$x_{\min}\$ 分别表示同一维度内数据的最大与最小值，\$x_k\$ 表示数据输入值，\$x'_k\$ 表示数据归一化后的数值。

(2) 隐含层的选择：隐含层层数与隐含层节点数的选择直接影响神经网络的性能的重要参数。根据经验公式来确定隐含层节点数的数量

$$n = \sqrt{n_0 + n_1} + c \quad (7)$$

式中，\$n_0\$ 为输入层节点数，\$n_1\$ 为输出层的节点数，\$c\$ 取 1 到 10 之间的常数。

(3) 参数设计：训练过程中确定某输入单元 \$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)\$ 和理论输出单元 \$Y\$，则神经网络实际输出与理论输出之间误差可表示如下。

某隐含层输出

$$M_i = f\left(\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \theta_j\right) \quad (8)$$

网络实际输出层输出为

$$Y = f\left(\sum_{i=1}^m M_i N_i - \varphi_i\right) \quad (9)$$

网络输出误差平方和为

$$e_p = \frac{1}{2}(d - Y)^2 \quad (10)$$

式中，\$W_{ij}\$ 为相邻隐含层与输入层任意两节点连接权值，\$N_i\$ 为相邻输出层与隐含层任意两节点连接权值。如果在训练中出现误差过大不满足期望要求时，通过反向求偏导进行矫正，其公式为

$$\Delta W_{ij}(n) = \eta \frac{\partial e_p}{\partial W_{ij}} + \alpha \Delta W_{ij}(n-1) \quad (11)$$

$$\Delta M_{ij}(n) = \eta \frac{\partial E_p}{\partial V_i} + \alpha \Delta V_i(n-1) \quad (12)$$

本文选择的训练次数为 50 000 次，从图 11 中可以看出，当训练次数达到 30 000 次后，交叉熵曲线几乎不发生变化，即训练误差趋于稳定，迭代收敛。使用 80 个测试样本进行神经网络准确度检验，将四个熔池-小孔特征参数作为输入量，将熔透程度作为输出量，当 \$Y\$ 为 1 表示熔透程度高，0 表示熔透程度低。验证结果如图 12 所示，结果表明推算熔透与实际熔透的吻合度为 95.06%，证明该 BP 神经网络具有足够准确度与可靠性，能实现高效深熔锁孔 TIG 焊接质量检测。

图 11 学习曲线

图 12 测试样本预测结果

4 试验结果与分析

对所搭建的机器人深熔 K-TIG 焊接系统进行试验验证，焊接参数为：焊接电流 510 A、焊接速度 320 mm/min，其中焊接高度设为不同值，分别为 1 mm、2 mm、3 mm 和 4 mm。将这些焊接高度值作为高度标准值输入控制系统，通过电弧电压传感器进行反馈控制，实现高度自适应的自动焊接。同时，通过熔透检测系统对熔池-小孔特征参数进行提取如图 13 所示，将该参数输入到 BP 神经网络中进行推算得到检测结果，如表 1 所示。

(a) 焊接高度为 1 mm

(b) 焊接高度为 2 mm

(c) 焊接高度为 3 mm

(d) 焊接高度为 4 mm

图 13 不同焊接高度下的熔池-小孔图像

表 1 焊接高度变化时熔池-小孔特征参数与焊接质量检测结果

焊接高度 H/mm	熔池宽度 W_1/mm	熔池半长 L_1/mm	小孔宽度 W_2/mm	小孔半长 L_2/mm	熔透 程度
1	11.55	20.98	8.33	5.61	低
2	11.64	22.63	8.74	6.26	低
3	12.05	24.47	9.06	5.61	高
4	13.52	23.83	9.52	5.98	低

根据检测结果可得,在焊接高度小于 3 mm,熔池宽度、熔池半长以及小孔宽度都随着焊接高度增加而增大。当焊接高度大于 3 mm 时,熔池-小孔特征参数下降,经神经网络推算可得,当焊接高度为 3 mm 时,焊缝具有最好的熔透程度,焊接质量最好。同时将试验所得试样进行切片处理,观察焊缝处横截面来分析真实的熔透程度,如图 14 所示,可见当

(a) 焊接高度为 1 mm

(b) 焊接高度为 2 mm

(c) 焊接高度为 3 mm

(d) 焊接高度为4 mm

图 14 焊接高度变化时焊缝横截面图

焊接高度为 3 mm 时, 确实得到了最好的焊接质量, 检测结果与真实结果吻合, 证明该焊接质量检测系统的准确性。

5 结论

(1) 本文构建了基于电弧电压传感的高度控制 K-TIG 自动焊接系统。根据焊接高度与电弧电压的对应关系, 通过实时检测电弧电压并转化为实际焊接高度值, 比较实际高度值与所设定的高度标准值, 来得出机器人运动偏差, 实现焊接高度自动控制。

(2) 本文实现了对熔池与小孔特征参数的提取, 对 CCD 相机收集的焊接图像进行图像预处理、区域分割。对熔池区域采用局部边缘提取, 然后进行椭圆曲线拟合, 得到熔池宽度、熔池半长; 对小孔区域使用最大连通域算法、边缘提取算法, 得到小孔宽、小孔半长。

(3) 焊接高度等焊接参数的选定基于焊接质量的检测, 本文提出一种熔透程度检测方法。根据熔透程度与熔池-小孔形态之间的关系, 构建 BP 神经网络, 将不同焊接高度下的熔池-小孔特征参数作为输入量, 输出对熔透程度的推算, 从而得到最佳的焊接高度, 实现了焊接质量的在线检测, 避免了选择焊接参数过程的烦琐, 提高了焊接效率。

参 考 文 献

[1] FENG S, TERASAKI H, KOMIZO Y, et al. Development of evaluation technique of GMAW welding quality based on statistical analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(6): 1257-1263.

[2] 马可, 薛龙, 黄军芬, 等. GMAW 自动焊熔透影响因素分析及多元回归预测[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 55-61.

MA Ke, XUE Long, HUANG Junfen, et al. Analysis of influencing factors and multivariate regression prediction

of GMAW automatic welding penetration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 55-61.

- [3] 宋凯, 曾琼, 何智成, 等. 基于超声参数化和熵模型的汽车焊点质量识别[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 86-92.
- SONG Kai, ZENG Qiong, HE Zhicheng, et al. Quality identification of automotive solder joints based on ultrasonic parameterization and entropy model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 86-92.
- [4] ZHANG H, HOU Y, ZHAO J, et al. Automatic welding quality classification for the spot welding based on the Hopfield associative memory neural network and Chernoff face description of the electrode displacement signal features[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 85: 1035-1043.
- [5] ZHANG Wan, JIA Minping, ZHU Lin, et al. Comprehensive overview on computational intelligence techniques for machinery condition monitoring and fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 782-795.
- [6] BUFFA G, CAMPANELLA D, PELLEGRINO S, et al. Weld quality prediction in linear friction welding of AA6082-T6 through an integrated numerical tool[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 389-396.
- [7] 张勇, 周昀芸, 王博, 等. 基于声发射信号的铝合金点焊裂纹神经网络监测[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 1-7.
- ZHANG Yong, ZHOU Yunyun, WANG Bo, et al. Neural network monitoring of aluminum alloy spot welding crack based on acoustic emission signal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 1-7.
- [8] 张朴, 彭齐治, 孔力. 基于虚拟仪器技术的激光焊接质量实时监测系统[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 24-26.
- ZHANG Pu, PENG Qizhi, KONG Li. Design of laser welding quality real-time monitoring system based on virtual instrument technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 24-26.
- [9] 韩喆. 基于 LabVIEW 的焊接质量检测系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- HAN Zhe. Research on welding quality inspection system based on LabVIEW[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [10] WU Chuansong. Proactive control effect of arc and weld pool behaviors by an external magnetic field in high speed GMAW[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 1.
- [11] WANG Z, ZHANG D. Progressive switching median

- filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images[J]. IEEE Trans. Circuits & Systems, 1999, 46(1): 78-80.
- [12] 蔡敏. 铝合金 GTAW 熔池区视觉特征检测及焊缝成型控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- CAI Min. Visual characteristics detection and weld forming control of aluminum alloy GTAW pool area[J]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [13] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [14] 李克海, 何德孚, 王国苹, 等. 脉冲 TIG 焊熔池几何参数的计算机视觉检测[J]. 焊管, 2000(6): 29-32, 36.
- LI Kehai, HE Defu, WANG Guoping, et al. Computer vision detection of geometric parameters of pulsed TIG welding pool [J]. Welded Pipe, 2000(6): 29-32, 36.
- [15] XIE Rong, WANG Xinmin, LI Yan, et al. Research and application on improved BP neural network algorithm[C]//Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on. IEEE, 2010: 1462-1466
- [16] KOHAVI R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1995 : 1137-1143.
- [17] KLINE D M, BERARDI V L. Revisiting squared-error and cross-entropy functions for training neural network classifiers[J]. Neural Computing & Applications, 2005, 14(4): 310-318.
-
- 作者简介: 张抱日, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为焊接自动化、焊缝跟踪、智能视觉检测。
E-mail: mebrzhang@mail.scut.edu.cn
石永华(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人焊接、水下焊接和高效深熔焊接技术。
E-mail: yhuashi@scut.edu.cn