

# 焊接电弧光谱信息模式识别软件的开发

云绍辉<sup>1,2</sup>, 张德勤<sup>2</sup>, 韩国明<sup>3</sup>

(1. 天津大学 系统工程研究所, 天津 300072; 2. 九江学院 材料科学与工程学院, 江西 九江 332005; 3. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 采用模式识别方法, 用 Visual Basic 开发了一套熔滴过渡光谱信号模式识别软件系统。根据熔滴过渡与光谱信号的对应关系, 以及光谱信号波形的几何特征, 抽取了多个关键性的特征参数。基于统计模式识别的 Bayes 决策理论, 建立了相应的识别函数和最小距离法分类器。判别结果表明, 利用该系统能够较好地对 MIG, MAG 和 CO<sub>2</sub> 焊熔滴过渡类型进行自动识别, 为实现熔化极气体保护焊熔滴过渡自动控制奠定了基础。

**关键词:** 熔滴过渡; 光谱信号; Bayes 决策; 模式识别

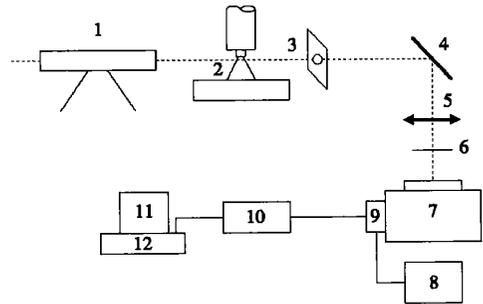
中图分类号: TG113 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)09-021-04



云绍辉

## 0 序 言

熔化极气体保护焊熔滴过渡的观测和控制的研究, 对于焊接过程及质量控制具有重要意义。目前熔滴过渡的控制主要集中于脉冲熔化极气体保护焊的一脉一滴的控制, 并已取得了很好的成果<sup>[1,2]</sup>。而对于熔化极气体保护焊常见的熔滴过渡形式的控制, 是人们关注的热点之一。要实现熔滴过渡的控制, 必须有高品质的传感信号和自动识别方法。通过研究熔化极气体保护焊电弧光谱, 已揭示出熔滴过渡条件下, 电弧光谱的动态特征与熔滴过渡之间存在着很好的对应关系<sup>[3]</sup>。据此, 作者利用模式识别原理, 开发了一套模式识别软件, 实时识别熔滴过渡类型, 为利用电弧光谱信号进行焊接自动控制奠定了基础。



1 激光管 2 电弧 3 光阑 4 反射镜组 5 透镜组 6 狭缝  
7 光谱仪 8 高压电源 9 光电倍增管 10. 模式接口 11. 显示器 12 计算机主机

图 1 通用焊接电弧光谱测量装置

Fig. 1 General measurement equipment of spectrum signal of welding arc

## 1 电弧光谱信号的采集

为了获得熔化极气体保护焊熔滴过渡的光谱信号, 建立了如图 1 所示的熔滴过渡光谱信息采集系统。

熔化极气体保护焊熔滴过渡时的电弧辐射, 通过光学系统成像于光谱仪入口狭缝处, 进入光谱仪的光信号经色散和聚焦, 在光谱仪聚焦平面上得到

分立的光谱信号。在选定的波长上, 由光电倍增管接收并转换为相对于时间的电压响应信号, 经 A/D 转换被计算机采集、处理和识别。

利用图 1 所示系统, 选择谱线 FeI6024 作为检测谱线, 得到 CO<sub>2</sub> 焊大颗粒、细颗粒和短路过渡, 熔化极氩弧焊(MIG, MAG)射滴和射流过渡两种过渡类型的典型光谱强度波形, 如图 2 所示。对于一种过渡形式焊接工艺参数不同时, 通过采集的大量波形可以看出, 其光谱波形的基本形态是一样的, 只是由于工艺参数不同而使得谱线脉动幅度、脉动间隔不同。

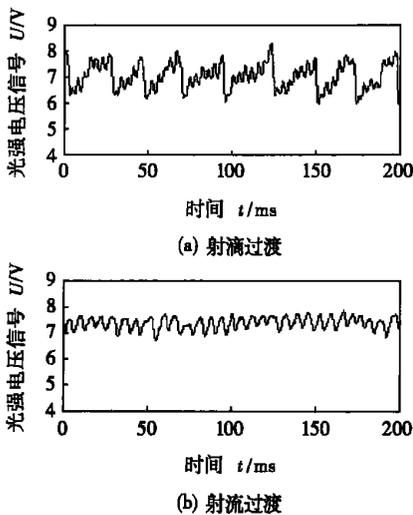


图 2 典型熔滴过渡光谱强度波形

Fig. 2 Typical spectrum intensity waveform of metal transfer

## 2 系统开发工具及结构

在研究中选用 Visual Basic 作为开发工具。根据系统的功能要求, 识别软件系统由样本采集、预处理、特征提取和选择、分类决策及分类器设计、结果输出等模块组成。各模块既相互联系, 又具有各自的独立性, 可以直接显示识别结果, 也可逐步完成识别过程。

## 3 自动识别软件主要模块及其功能

基于统计方法的模式识别系统主要由五个部分组成, 数据获取、预处理、特征提取和选择、分类器设计、分类决策, 如图 3 所示。

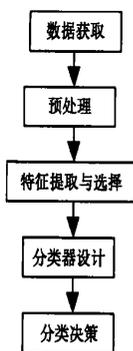


图 3 统计模式识别过程流程图

Fig. 3 Flow chart of statistical pattern recognition

### 3.1 预处理模块

预处理的目的是去除噪声, 加强有用的信息。在焊接过程中存在着许多干扰因素, 如焊接电流与电压的波动、送丝机构不稳定等, 这些都有可能引起电弧不稳, 导致光谱波形的失真; 此外, 测量机构的误差等也会对真实波形产生一定的影响, 因此需要对采样数据进行一定的预处理, 增加信噪比, 降低识别的错误率。

综合考虑对原始数据进行曲线平滑和插值处理的结果和计算值, 确定用五点三次平滑方法<sup>[4]</sup>作为对学习样本和检验样本的预处理手段, 五点三次平滑方法如下。

设已知  $n$  个等距点  $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1}$  上的试验数据为  $y_0, y_1, \dots, y_{n-1}$ , 则可以在每个数据点的前后各取两个相邻的点, 用三次多项式  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$  进行逼近。

### 3.2 特征提取与选择模块

熔化极气体保护焊五种熔滴过渡的光谱波形均为一维波形, 根据采集的各种熔滴过渡光谱强度波形曲线的几何特征, 抽取以下参数为初始特征参数<sup>[9]</sup>。

(1) 幅域特征参数: 均值  $\bar{x}(x_1)$ , 方差  $\sigma_x^2(x_2)$ , 均方值  $\bar{x}^2(x_3)$ , 均方根值  $x_{ms}(x_4)$ , 标准差  $\sigma_x(x_5)$  和极值差  $\Delta x(x_6)$ 。

(2) 时域特征参数: 自相关函数  $R_x(\tau)(x_7)$ 。

(3) 频域特征参数: 振幅峰频  $f_M(x_8)$ , 振幅中频  $f_v(x_9)$ 。

利用采集的大量五种熔滴过渡光谱信号数据作为标准样本, 对每一类提取上述这 9 个特征参数, 并通过统计分析建立其相应的特征向量, 组成一个反映本质特征的多维特征空间。为了有效地实现分类判别, 要对采样数据进行变换, 把在多维特征空间中表示的模式转变为低维特征空间。采用主成分分析法, 利用坐标变换, 从原有特征得到一批新特征, 每个新构造的特征都是原有各特征的线性函数。根据主成分分析法<sup>[9]</sup>基本原理和计算方法, 在所研究的条件下, 得到两个新的特征向量, 即

$$\begin{cases} y_1 = 0.04x_1 + 0.93x_2 + 0.06x_3 + 0.21x_4 + 0.13x_5 + \\ \quad 0.06x_6 - 0.18x_7 - 0.07x_8 + 0.118x_9, \\ y_2 = -0.01x_1 - 0.33x_2 + 0.19x_3 + 0.65x_4 - 0.03x_5 + \\ \quad 0.19x_6 - 0.2x_7 - 0.03x_8 + 0.6x_9. \end{cases}$$

### 3.3 分类决策模块

在研究中, 要把焊接过程中的熔滴过渡类型归于已知的国际焊接学会分类的熔化极气体保护焊常见的五种过渡类型中的一类, 并使之最大限度地与

焊接专家的判别结果相一致。该系统采用基于最小错误率的贝叶斯决策<sup>[5]</sup>进行判别。

基于最小错误率的贝叶斯决策是建立在贝叶斯公式基础上的,使分类错误率达到最小的一种判决规则。这一规则规定将模式样本  $x$  划归后验概率较高的那种类型。

对于多类情况,设  $Q = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$ ,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_d]^T$ , 则判决规则有如下四种等价形式。

$$P\left(\frac{\omega_j}{x}\right) > P\left(\frac{\omega_i}{x}\right), \quad (1)$$

$$j=1, 2, \dots, c, j \neq i \Rightarrow x \in \omega_j; \quad (1)$$

$$p\left(\frac{x}{\omega_j}\right)P(\omega_j) > p\left(\frac{x}{\omega_i}\right)P(\omega_i), \quad (2)$$

$$j=1, 2, \dots, c, j \neq i \Rightarrow x \in \omega_j; \quad (2)$$

$$l(x) = \frac{P\left(\frac{x}{\omega_j}\right)}{P\left(\frac{x}{\omega_i}\right)} > \frac{P(\omega_j)}{P(\omega_i)}, \quad (3)$$

$$j=1, 2, \dots, c, j \neq i \Rightarrow x \in \omega_j; \quad (3)$$

$$\ln\left[p\left(\frac{x}{\omega_j}\right)\right] + \ln[P(\omega_j)] > \ln\left[p\left(\frac{x}{\omega_i}\right)\right] + \ln[P(\omega_i)], \quad (4)$$

$$j=1, 2, \dots, c, j \neq i \Rightarrow x \in \omega_j; \quad (4)$$

式中:  $p(x/\omega_i)$  为类概率密度;  $P(\omega_i)$  为先验概率;  $P(\omega_i/x)$  为后验概率;  $c$  为类型数。

精确计算类概率密度是比较困难的,而当某一样本的特征较多地分布在这一类的特征均值附近,远离均值的点较少时,可以用正态分布作为这一类的概率分布模型。

由最小错误率判决规则抽象出来的判决函数为

$$g_i(x) = p\left(\frac{x}{\omega_i}\right)P(\omega_i).$$

若  $p(x/\omega_i)$  服从  $N(\mu_i, \Sigma_i)$ , 则  $g_i(x)$  可写成如下形式

$$g_i(x) = \frac{P(\omega_i)}{(2\pi)^{\frac{d}{2}} \|\Sigma_i\|^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x-\mu_i)\right], \quad i=1, 2, \dots, c. \quad (6)$$

对上式取对数后作为判决函数,有

$$g_i(x) = \ln[P(\omega_i)] - \frac{d}{2} \ln[2\pi] - \frac{1}{2} \ln[\|\Sigma_i\|] - \frac{1}{2}(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x-\mu_i), \quad i=1, 2, \dots, c. \quad (7)$$

略去与类型无关项,得判决函数为

$$g_i(x) = -\frac{1}{2} \ln[\|\Sigma_i\|] -$$

$$\frac{1}{2}(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x-\mu_i), \quad i=1, 2, \dots, c. \quad (8)$$

若各类的协方差矩阵相等,从几何上看,相当于各类样本集中于该类均值点  $\mu_i$  为中心的同样大小和形状的超椭圆内,则判决函数  $g_i(x)$  可简化为

$$g_i(x) = -\frac{1}{2}(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x-\mu_i), \quad i=1, 2, \dots, c; \quad (9)$$

式中:  $(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x-\mu_i) = \gamma^2$  为马氏距离的平方。

这时决策规则为,分别计算未知类别到每类已知类别的均值点的马氏距离的平方,把  $x$  归于  $g_i(x)$  最小的类别。

对于任一未知类别,首先依次进行特征抽取,形成特征空间中的一个特征向量  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ , 然后根据马氏距离判别决策理论,计算它与各类的特征向量之间的距离来决策当前的类别,设有  $m$  个总体  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ , 根据标准样本分别计算出它们的均值向量  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$  和协方差矩阵  $S_1, S_2, \dots, S_m$ 。对于待识别样本  $x$ , 计算出  $x$  分别到  $m$  个总体的马氏距离为

$$d^2 = (x-\mu_i)^T S_i^{-1}(x-\mu_i),$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m$ 。

然后比较这  $m$  个距离值的大小,令

$$R_i = [x: d^2(x, \mu_i)] = \min d^2(x, \mu_j),$$

式中:  $j \neq i, i, j=1, 2, \dots, m$ 。

式中的  $R_i$  代表一个区域,在这个区域内,  $x$  到  $\mu_i$  的距离比到  $\mu_j (j=1, 2, \dots, m, j \neq i)$  的距离都近,则判别规则为  $x \in \mu_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。因此设计的最小距离分类器结构如图 4 所示。

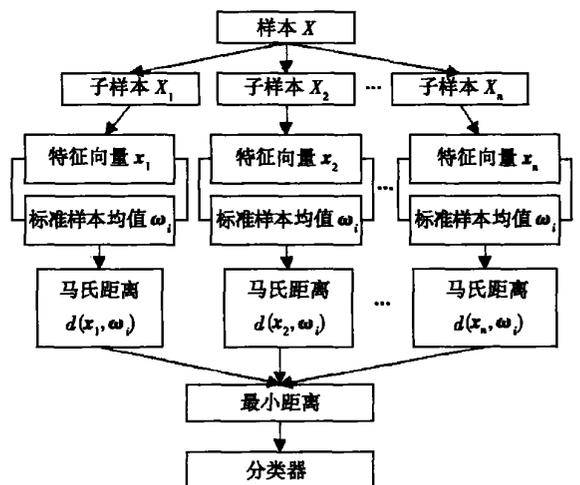


图 4 最小距离分类器结构图

Fig. 4 Structure of minimum distance classifier

## 4 识别与评价

把采集的样本  $X$  (2 000 个数据点) 经预处理后平均分成 8 等份, 变成 8 个子样本  $X_i$ ,  $i=1, 2, \dots, 8$ 。分别计算每一个子样本  $X_i$  的 9 个初始特征值  $x_i$ ,  $i=1, 2, \dots, 9$ 。其次由主成分分析法分别计算 8 个子样本的特征向量值, 再分别求出这些特征向量值到五种过渡类型特征向量的平均值  $\mu_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 的距离。

在自动识别时发现, 细颗粒过渡和短路过渡这两种过渡类型的距离可分性较差, 但它们的焊接能量存在较大差别。因而对以上两种过渡类型进行判别后, 再增加一个判决规则, 即把该样本的特征向量用焊接电流去除, 然后再计算检验样本到学习样本特征向量均值的距离, 重新做出判决。

应用以上所述的熔滴过渡类型模式识别软件对熔化极气体保护焊焊接过程中的熔滴过渡进行了自动识别, 识别错误率为 5%, 满足识别精度的要求。

## 5 结 论

(1) 利用模式识别原理和方法, 采用 Visual Basic 在 Windows 环境下成功地开发了一套熔滴过渡光谱信号模式识别软件系统。该系统具有操作简便、功能齐全、界面友好和识别精度高等特点。

(2) 熔滴过渡模式识别软件系统由样本采集、

预处理、特征提取、判别规则和分类器设计、主窗口结果输出等模块组成。各模块既相互联系, 又具有各自的独立性, 可以直接显示识别结果, 也可分步完成识别过程。该系统拥有功能强大的在线帮助和较强的容错能力。

(3) 利用开发的熔滴过渡光谱信号模式识别软件系统, 成功地对熔化极气体保护焊熔滴过渡形式进行自动识别, 具有较高的准确性和识别精度, 为实现熔化极气体保护焊熔滴过渡自动控制奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 张 龙. 脉冲 MIG (MAG) 焊熔滴过渡的弧光传感及其实时控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.
- [2] 诺特布鲁赫 S. 利用脉冲电弧进行金属极气体保护焊时在线观测熔滴过渡 [J]. 国际焊接工程与设备, 1998, 32(2): 68-74.
- [3] 柳 刚. 熔化极气体保护焊熔滴过渡的光谱信息及其检测的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1998.
- [4] 徐士良. C 常用算法程序集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [5] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [6] 王碧泉, 徐祖荫. 模式识别 — 理论、方法和应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1989.

作者简介: 云绍辉, 女, 1973 年 11 月出生, 讲师, 博士研究生。主要从事焊接冶金、自动控制方面的研究工作, 发表论文 20 余篇。

Email: yunshaohui@sohu.com

China Academy of Machinery Science and Technology, Harbin 150080, China). p17–20

**Abstract:** The experiments of dual laser beam brazing of galvanized steel sheets with automatic wire feeding were carried out, in which CuSi3 was used as filler metal. The influence of laser power, defocusing type, dual laser beam energy ratio and distance between the spots on joint quality were analyzed. The experimental results indicate that better process adaptability is found in dual beam brazing with the variation of laser power, and more excellent joint quality is obtained when negative defocusing account of parallel beam brazing is used, or the distance between the spots of tandem dual laser beams is 2 mm and the first laser beam power is larger than the second one. Moreover, optical microscope, SEM and EDX were used to analyze the microstructures and elements distribution at the interface. The results show that the base metal grain size of the dual beam brazed joint is smaller than the single beam brazed joint's and the coarse grain zone is narrower. At the same time, there are Fe-Si intermetallics at the interface of dual beam brazed joint.

**Key words:** laser brazing; dual laser beam; brazing quality; interface analysis

#### Pattern recognition of spectrum information of metal transfer

YUN Shao-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG De-qin<sup>2</sup>, HAN Guo-ming<sup>3</sup> (1. Institute of Systems Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Materials Science and Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, Jiangxi, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p21–24

**Abstract:** A software system for pattern recognition of spectrum signal of metal transfer mode was developed using Visual Basic. Based on consistency of the spectrum and metal transfer and geometrical pattern features of the spectrum, several key characteristic parameters were extracted. Correspondent recognition function and a minimum-distance classifier were constructed based on Bayes decision theory. The results show that using this system, pattern recognition of metal transfer mode for metal inert-gas welding, metal active-gas welding, and CO<sub>2</sub> welding can be done automatically. This provides a basis for automatic control of metal transfer in metal gas arc welding.

**Key words:** metal transfer; spectrum signal; Bayes decision; pattern recognition

#### A image processing and features extraction method for structured light image of welding seam

LI Yuan<sup>1,2</sup>, XU De<sup>1</sup>, SHEN Yang<sup>1,2</sup>, TAN Min<sup>1</sup> (1. Laboratory of Complex Systems and Intelligence Sciences, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Graduate University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100049, China). p25–30

**Abstract:** A method of image processing and features extraction was presented for structured light images of welding seams by which the seam features images are detected with the disturbances such as reflection. The profiles of grooves were obtained by detecting the peaks of intensity curve of column pixels, and a criterion of temporal and spatial continuity of laser stripe was adopted to judge validity of points. According to the profiles of welding groove, the center of gravity of the groove was selected and extracted as feature point. Experimental results of welding seam tracking testified the effectiveness and reliability of the method.

**Key words:** image processing; features extraction; welding seam tracking; structure light vision

#### Microstructure of lead-free solder for a SnAgCuEr system

TIAN Jun<sup>1,2</sup>, HAO Hu<sup>1</sup>, SHI Yao-wu<sup>1</sup>, XIA Zhi-dong<sup>1</sup> (1. School of Materials Science & Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Department of Electromechanical and Automatic Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350014, China). p31–34

**Abstract:** Effect of minimum amount rare earth Er on microstructure and performance has been systematically investigated for a Sn3.8Ag0.7Cu lead-free solder alloy. It is found that the addition of minimum amount Er in the Sn3.8Ag0.7Cu solder leads to slight decrease in melting temperature, increase in spreading area and shear strength. Through observation of microstructure, the area fraction of eutectics is increased and the size of prime intermetallic compounds (IMC) is decreased due to the effect adding Er. The thickness of IMC layer between solder and substrate Cu is restrained in the aging process, and the restraint is especially evident after aging of 400 h. This will be helpful for the reliability of soldered joint. The results indicate that the SnAgCuEr alloy with minimum amount rare earth is lead-free solder alloy with excellent performance.

**Key words:** lead-free solder; SnAgCu alloy; rare earth Er; microstructure; aging treatment

#### Influence of aluminum alloy pulsed MIG welding parameters on visual sensing effects

SHI Yu<sup>1</sup>, FAN Ding<sup>2</sup>, HUANG An<sup>1</sup>, CHEN Jian-hong<sup>2</sup> (1. Education Ministry Key Lab of Advanced Processing Technology for Non-ferrous Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Lab of Gansu New Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Gansu Province, Lanzhou 730050, China). p35–38

**Abstract:** The influence of the pulsed MIG (metal inert gas) welding parameters on visual sensing effects in aluminum alloy welding process was investigated by using designed CCD visual sensing system. By altering the welding parameters, the influence of welding