

文章编号: 0258-7025(2007)04-0538-05

基于多传感器融合的激光焊接熔透状态的识别

王春明, 吴松坪, 胡伦骥, 胡席远

(华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为实现对激光焊接过程中常出现的不同熔透状态的实时辨识, 使用多种传感器采集焊接过程中的可听声、蓝紫光 and 红外辐射信号, 并提取了反映熔透状态的 6 个信号特征。基于特征级的多传感器信息融合技术, 采用模拟退火算法对信号特征进行组合优化和关联融合, 确定了反映融合规则的“特征融合系数”, 并以 BP 网络为框架构建识别熔透状态的模式分类器。研究结果表明, 通过样本训练和信号特征优化组合, 所构建的模式分类器对“过熔透”、“完全熔透”、“不稳定熔透”和“未熔透”等四种熔透状态的辨识准确率达到 88% 以上。从而提供了一种有效的激光焊接质量在线检测方法。

关键词 激光技术; 激光焊接; 多传感器融合; 模式识别; 人工神经网络

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Identification of Different Laser Welding Penetration States Based on Multi-Sensor Fusion

WANG Chun-ming, WU Song-ping, HU Lun-ji, HU Xi-yuan

(Material Science and Technology College, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract In order to classify typical penetration states in laser welding process, multi-sensors are applied to acquire the audible sound, ultraviolet and infrared (IR) emission signals, also penetration-state-relating features of each signal are extracted. Based on feature-level information fusion, simulated annealing algorithm is utilized to optimize characteristic signals, consequently setting the “coefficients of feature fusion”. Pattern classifier is designed using back propagation (BP) network. It is found that through samples training and optimizing, a classification of 88%~100% has been made for detection of the four distinct penetration states such as “excessive penetration”, “full penetration”, “unstable penetration”, and “partial penetration”. So, an effective method for on-line monitoring for laser welding quality is provided.

Key words laser technique; laser welding; multi-sensor fusion; pattern classification; artificial neural network

1 引言

目前, 板材激光拼焊技术已广泛应用于汽车制造业、钢铁冶金等行业, 并已经成为节省制造成本和提高制造质量的核心技术。而焊缝的熔透状态是衡量激光拼焊焊缝成形质量的最重要指标。工程中, 一般要求焊缝完全熔透, 不允许未熔透(包括不稳定熔透)、过熔透等情况发生。并且, 对激光焊接各种熔透状态的实时监测与识别, 是激光焊接向高度智

能化控制方向发展的基础。

通过多传感器采集反映焊接过程的小孔、等离子体或熔池的发射信号, 并从时域、频域对信号进行分析与提取, 运用人工神经网络、模糊控制等方式对焊接质量作诊断, 已成为激光焊接过程质量控制的重要方法之一。国内一些学者通过小波分解, 提取激光焊接过程声音信号的特征信息, 并用 BP 网络对多种焊接缺陷进行了识别^[1]。近年来, 国外有学者通过采集焊接过程中多种辐射信号, 提取其频谱,

收稿日期: 2006-07-03; 收到修改稿日期: 2006-12-04

基金项目: 湖北省自然科学基金(2005ABA302)资助项目。

作者简介: 王春明(1975—), 男, 博士, 副教授, 现主要从事材料激光加工方面的研究。

E-mail: cmwang@mail. hust. edu. cn

运用线性分类算法对各种熔透状态进行识别, 准确率为 88%~98%^[2]。另外一些学者对采集到的多种传感器信号进行多维特征提取, 并采用信息融合技术对特征进行优化, 通过分类程序对焊缝熔深状态加以识别^[3]。C. Alippi 等^[4]将传统的 KNN (K Nearest Neighbors) 分类法结合瀑布模型的人工神经网络, 对信号进行识别, 以识别不同熔透状态。

为提高实时监测系统的可靠性, 本文采用了多种传感器实时采集激光焊接过程中的可听声、蓝紫光^[5]和红外辐射信号; 通过均方根 (RMS) 值和数字滤波处理提取信号特征; 运用基于特征级的多传感器信息融合技术, 对信号特征进行组合优化和关联融合; 最后设计合适的 BP 网络作为模式分类器, 完成对各种熔透状态的区分。

2 熔透状态信号特征及其提取

选取激光功率 1.5 kW, 焊接速度 1.6 m/min, 焊接如图 1 所示的楔形板。依次出现过熔透、完全熔透、不稳定熔透和未熔透四种状态, 即为研究所需区分的目标。图 2 为四种典型熔透状态的焊缝横截面图。

对传感器采集的三路信号进行均方根值计算, 短时傅里叶变化和特征频段滤波等分析后, 发现三

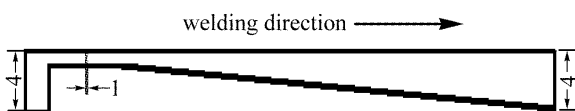


图 1 楔形板试样

Fig. 1 Cuneiform specimen

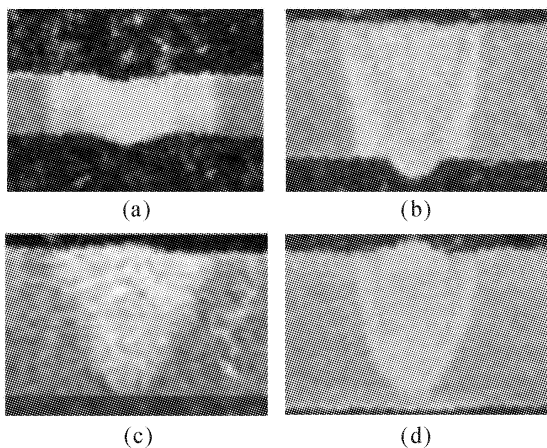


图 2 各种熔透状态焊缝截面图

(a) 过熔透; (b) 完全熔透; (c) 不稳定熔透; (d) 未熔透

Fig. 2 Sectional welds of different penetration status

(a) excessive penetration; (b) full penetration;

(c) unstable penetration; (d) partial penetration

路信号的均方根值和 2000~3500 Hz 这个特征频段上的信号同激光焊接过程中小孔-等离子体-熔池体系密切相关, 能很好反映各种熔透状态; 并且得到的数据比较容易进行数值处理^[6]。本文通过这两种信号处理方式, 获得了三种信号的六组特征, 作为模式识别系统的输入参数。

3 基于模拟退火算法的特征级信息融合方法

对于多传感器信息融合, 目前学者们普遍接受 3 级融合结构, 即数据级、特征级和决策级。本文选择基于特征级融合的算法, 是因为特征级融合有利于实时处理, 并且由于所提供的特征直接与决策分析有关, 因而融合结果能最大限度地给出决策分析所需要的特征信息^[7]。

3.1 特征级融合算法及目标函数的确定

从三种传感信号、每个信号提取两个特征, 共提取到的六个特征向量为 $\mathbf{V}_0 = [V_1, V_2, \dots, V_6]$, 定义 $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_6]$ 为六个特征向量的“特征组合系数”, 作为各特征在融合特征中的权重系数, 表示对这六个特征在识别决策中的信任程度。 \mathbf{V} 为模式的“融合特征”向量 $\mathbf{V} = [a_1 V_1, a_2 V_2, \dots, a_6 V_6]$ 。本文使用模拟退火算法搜索最佳的“特征组合系数”。

模拟退火算法思想源于固体退火过程: 将固体加温至充分高, 再让其慢慢冷却。加温时, 固体内部粒子随温升变为无序状, 内能增大; 慢慢冷却时粒子渐趋有序, 在每个温度都达到平衡态, 最后在常温时达到基态, 内能最小。

模拟退火算法中目标函数的定义直接关系到模式可分性的好坏。对于激光熔透状态模式识别问题, 目标函数 φ 采用如下方式定义。假定 $E_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为对 n 个训练样本用特征组合系数 \mathbf{A} 进行融合后模式识别的目标输出, $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为实际输出; 那么目标输出和实际输出的距离可以定义为

$$D_i = |E_i - R_i|,$$

同时设识别错误总次数为 M , 那么模拟退火算法的目标函数 φ 可表示为

$$\varphi(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n |E_i - R_i| + M = \sum_{i=1}^n D_i + M.$$

3.2 模拟退火算法的实现

模拟退火算法在应用于特征组合优化时, 首先选定初始温度 $T_0 > 0$ 和初始选定的一组特征组合

A_0 。然后依据一定方法给出仅与前一特征组合方式相关的新的组合 A' 。退火过程由适当的冷却规则控制。模拟退火算法基本步骤为:

1) 初始温度 $T_0 = 30\text{ }^\circ\text{C}$, 一组初始的特征融合系数 $A_0 = [1, 1, 1, 1, 1, 1]$, 计数器 k 。

2) 在特征组合 A 的基础上, 加上一随机扰动, 产生一新的特征组合 A' 。计算目标函数 φ , 若 $\Delta\varphi(A_{\exists}) < 0$, 则 $A = A'$, 作为下一状态; 若 $\Delta\varphi(A_{\exists}) > 0$, 则依概率 $e^{-\Delta\varphi(A')/T}$ 接受状态 A' 。接受则 $k = 0$, 否则 $k = k + 1$ 。

3) 如果 T_i 还未达到平衡态, 则转到 2)。

4) 如果 T_i 已经足够低, 或者 $k > 3$ (即组合状态 3 次未发生变化) 则结束, 当时的特征组合即为算法的结果。否则继续。

5) 由 $T_{i+1} = T_i \times T_{\text{rend}}$ 计算下一状态温度, 其中 T_{rend} 取 $0 \sim 1$ 之间一有理数。转到 2)。

以上算法是基于 Matlab7.0 平台实现的。

4 模式分类器的设计

为了实现对熔透状态的实时诊断, 以便实现激光焊接过程自动化, 必须采用智能化的模式识别方法。本文选择具有自组织和自学习能力的人工神经网络为模型构建模式分类器。神经网络种类繁多, 但鉴于实际应用中 BP 网络是实现模式识别功能时选用最多的网络, 因此亦选取此网络结构。

4.1 BP 网络节点设计

采用 3 层 BP 网络, 结构示意图如图 3 所示。依据所提取的特征量个数, 输入层神经元个数为 6 个。考虑到本模式分类器的目的是识别四种不同的激光焊接熔透状态, 因此, 网络的输出必须要能表示出四种状态即可。类似于模糊控制中隶属度的概念, 研究选择使用四个不同分量 $[a, b, c, d]$, 即四个输出量来表示对四种熔透状态的贴合程度。理想的对应关系如表 1 所示。

表 1 典型熔透状态与理想输出之间的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between typical penetration states and ideal output of network

| Typical penetration | Ideal output vector |
|-----------------------|---------------------|
| Partial penetration | [1, 0, 0, 0] |
| Unstable penetration | [0, 1, 0, 0] |
| Full penetration | [0, 0, 1, 0] |
| Excessive penetration | [0, 0, 0, 1] |

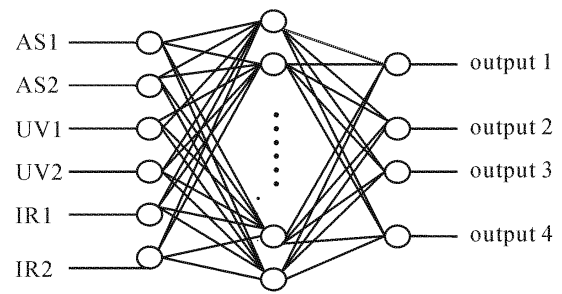


图 3 BP 网络结构示意图

Fig. 3 Structure of BP network

神经网络的输出值不会一直是理想的布尔量输出。因此, 判断熔透状态的规则是哪个分量最大, 并且接近于 1, 那么就认为贴合相应的熔透状态程度高。例如, 若输出为 $[0.95, 0.02, 0.10, 0.05]$, 那么就认为是未熔透状态。

隐含层神经元个数决定了网络的复杂程度。神经元太多, 神经网络训练时间会较长, 过少可能导致最终结果不收敛。本文选用隐含层含有 8 个神经元的 BP 网络, 可以获得较好的效果。

4.2 传递函数及训练算法、参数的选取

隐含层和输出层的传递函数都选择 logsig 函数, 因为它的输出范围 $(0 \sim 1)$ 正好适合在学习后输出布尔值。

对于大多数问题, 修正的最小二乘法优化 (LM) 算法可以获得相对较好的结果。选取最小二乘法优化算法, 并且为了防止可能的不收敛而导致的运算停滞现象, 将算法中的迭代时间设置为 3 min。

网络训练之前一般对如下参数进行赋值, 主要包括最大训练步数、显示间隔、动量参数、目标精度和学习率, 其他参数可用缺省值。其中目标精度 (也称期望误差, 就是均方差 (MSE) 的取值) 当然希望越小越好, 但是降低误差需要增加隐层节点, 或是以增加训练时间为代价, 模型目标精度选为 0.02。对于学习率, 一般随着学习率的增大, 迭代次数会明显减小。但对于较大规模的神经网络来说, 当学习率较大时, 网络会发散或振荡起来, 因而网络规模越大, 学习率要越小。选择初始学习率为 0.01。表 2 为 BP 网络模型部分训练参数的设定值。

另外, BP 网络的收敛情况以及泛化特性对初始权值和阈值的选取比较敏感。取 $(-1, 1)$ 之间的小随机数初始化权值和阈值, 这样做是保证学习过程能有效启动且公正进行的必然措施。

表 2 部分训练参数设定值

Table 2 Parameters for training

| Study step | 0.01 |
|------------------------------|------|
| Expected error (MSE) | 0.02 |
| Frequency of displaying time | 20 |
| Momentum parameter | 0.9 |
| Maximum interactive number | 5000 |

5 基于特征级融合的模式识别结果

为了检验模式识别系统对四种熔透状态的模式区分能力,并对比经过基于模拟退火的特征融合处理后的优化样本和未经融合处理的样本,对模式识别效果的影响,安排了两种情况下的样本分别进行了实验。四种待识别模式中,每种模式训练样本数 25 个,训练样本总数 100 个;测试样本总数亦为 100 个。识别结果如表 3,4 所示。

表 3 未经过特征级信息融合样本识别结果

Table 3 Classification result without sensor fusion

| Pattern | Right | Wrong | Unsure |
|-------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Excessive (I) | 25/25 (100%) | 0/25 (0%) | 0/25 (0%) |
| Full (II) | 24/25 (96%) | 0/25 (0%) | 1/25 (4%) |
| Unstable (III) | 18/25 (72%) | 3/25 (12%) | 4/25 (16%) |
| Partial (IV) | 22/25 (88%) | 1/25 (4%) | 2/25 (8%) |

表 4 经过特征级信息融合样本识别结果

Table 4 Classification result with sensor fusion

| Pattern | Right | Wrong | Unsure |
|-------------------|-----------------|--------------|--------------|
| Excessive (I) | 25/25 (100%) | 0/25 (0%) | 0/25 (0%) |
| Full (II) | 25/25 (100%) | 0/25 (0%) | 0/25 (0%) |
| Unstable (III) | 22/25 (88%) | 2/25 (8%) | 1/25 (4%) |
| Partial (IV) | 24/25 (96%) | 1/25 (4%) | 0/25 (0%) |

表 3,表 4 中,正确是指输出最大值分量对应相应的模式,且比次大分量值大 0.5 以上;错误是指输出最大值分量不对应相应的模式;不确定是指输出最大值分量对应相应的模式,但与次大分量值间差距 ≤ 0.5 。

观察识别结果可以发现:

1) 不论是经过特征级融合后的样本,还是未经融合的样本,对于激光焊接过程中过熔透状态的识别准确率都是相当高的。这主要是因为三路信号的均方根值和特征频段幅值本身显著比其他状态要低很多,可完全将过熔透状态与其他各种熔透状态区分开来。另外,两组样本对完全熔透过程的辨识率也很高,网络的区分结果差异不大。

2) 对于不稳定熔透状态和未熔透状态,经过特征级融合后的样本对模式的识别能力明显要比不加优化的输入样本强。这说明 BP 网络对样本输入相当敏感,组合优化后的输入样本能更好地凸现出待识别模式的主特征,减小样本中次要因素的影响,提高了模式分类器的辨识率。

3) 即使是使用特征级融合后的样本,分类器对不稳定熔透状态的识别错误率仍然达到 8%,不确定率也达 4%。经仔细研究,发现这种状态的头几个样本与完全熔透状态最后几个样本差别甚微,即使优化组合样本输入后,也难以体现这种差异,导致了识别失败。这种差异很小的原因在于,不稳定熔透是完全熔透和未熔透之间的过渡状态,这三种状态间两两转变时,信号都是平滑过渡的,没有发生明显的突变,这一点由图 4 中区域 III(过渡熔透)和区域 II(完全熔透)、区域 IV(未熔透)的交界处的信号特征可以看出。当剔除掉几个“异常”的过渡状态样本后,重新进行融合与识别,发现对不稳定熔透状态的识别正确率可达 100%。

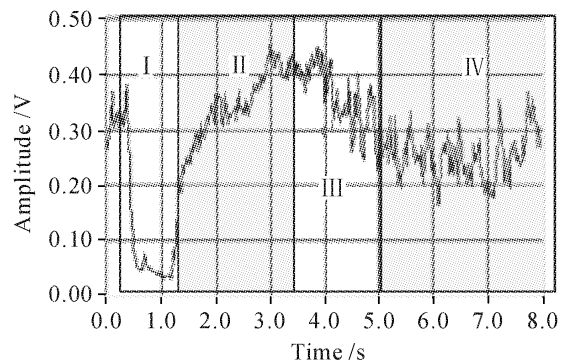


图 4 各种熔透状态可听声信号均方根值

Fig. 4 Audible sound's RMS value of different penetration states

4) 由模拟退火算法搜索得到的“特征组合系数” $\mathbf{A} = [12.8981, 11.3577, 10.4277, 13.4866, 11.7041, 8.7129]$,这六个特征分量分别是可听声、蓝紫光、红外辐射的均方根以及这三路信号特征频

段幅值的加权系数值。可以发现,就六种特征对分类器最后决策结果的影响程度而言,红外辐射信号的两组特征,尤其是其特征频段上的信号要比可听声和蓝紫光信号对分类结果影响程度略小。红外辐射信号 2000~3500 Hz 频段均方根幅值如图 5 所示,可以看出,各种熔透状态的分界线并不十分明显。这一点合理地说明了“特征组合系数”中对应分量值较小的原因。

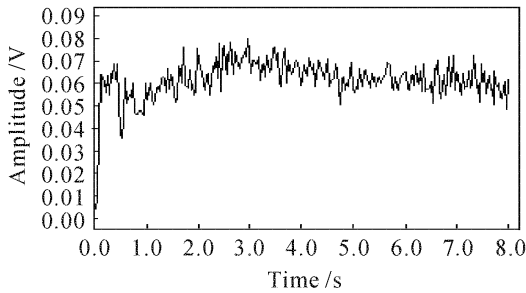


图 5 各种熔透状态的红外辐射特征频段信号值
Fig. 5 IR signal wave of characteristic frequency band of typical penetration states

6 结 论

1) 在特征级融合理论框架下,定义“特征融合系数”对多传感器观察到的模式特征进行融合,对不同的特征赋以不同融合系数,以得到凸现模式特征的优化输入样本;

2) 使用了模拟退火算法在解空间中搜索训练样本集的最佳“特征融合系数”,从而提高了模式识

别系统的性能;

3) 以 BP 网络为框架构建的模式分类器,组合优化后的样本对四种熔透状态的辨识准确率达到 88% 以上。

参 考 文 献

- 1 Zeng Hao, Zhou Zude, Luo Hong *et al.*. Wavelet analysis of acoustic emission signals with welding defect in laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(5):471~476
曾 浩,周祖德,骆 红等. 激光焊接缺陷声信号的小波分析 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(5):471~476
- 2 D. F. Farson, A. Ali, X. C. Li. Laser weld penetration monitoring with multiple emission signal measurements [J]. *Journal of Laser Application*, 1999, **11**(2):47~53
- 3 Allen Sun, Elijah Kannatey-Asibu, Jr., Gartner Mark. Monitoring of laser weld penetration using sensor fusion [J]. *Journal of Laser Application*, 2002, **14**(2):114~121
- 4 C. Alippi, G. D' Angelo, M. Matteucci *et al.*. Composite techniques for quality analysis in automotive laser welding [C]. *IEEE CIMSA2003*, 2003. 72~77
- 5 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun *et al.*. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):131~134
段爱琴,胡伦骥,王亚军等. 激光深熔焊焊缝的熔透性监测研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):131~134
- 6 Wu Songping, Wang Chunming, Hu Lunji *et al.*. Characteristic signal analysis and its identification of typical weld penetration status in laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(7):69~73
吴松坪,王春明,胡伦骥等. 激光焊接典型熔透状态信号特征分析及其识别 [J]. *焊接学报*, 2006, **27**(7):69~73
- 7 Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong. Pattern Recognition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 22~50
边肇祺,张学工. 模式识别 [M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 22~50

征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007 年增刊,将于 2007 年 3 月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果,包括激光连接(焊接、钎焊),激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等),激光强化(合金化、熔覆、沉积等),激光制备新材料,激光快速成形与激光快速制造,激光复合加工技术,激光微纳米技术,激光加工新技术与新应用,激光加工过程检测与控制,新型激光器件与光加工系统等领域,作者来自于国内近 40 个大中专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约 400 页,定价 100 元,进口雅光纸精印,光盘版定价 80 元,欢迎读者订阅。

联系人:高先生 电 话:021-69918253