

文章编号: 1001-3806(2007)05-0503-04

# 激光焊接过程多传感器在线检测系统的设计

王春明, 胡伦骥, 胡席远

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了提高激光焊接质量实时检测的可靠性, 采用虚拟仪器平台 LabVIEW 搭建了多通道信号采集和分析系统, 同时检测激光焊接过程中与焊接质量密切相关的可听声 (20Hz~20kHz)、等离子体蓝紫光 (400nm~500nm)、红外辐射 (1200nm~1600nm) 等 3 路信号。采用数字信号处理手段分析了 3 路检测信号的相关性, 发现两路光信号变化完全同步, 而声信号在时间上滞后于两路光信号, 滞后时间等于声音传播所需要的时间, 验证了所采集 3 路信号的有效性; 并通过实例证明了采用多传感器检测在可靠性方面的优势。实验结果表明, 采用多传感器检测与进一步的信息融合是实现激光焊接过程实时监测的发展方向。

**关键词:** 激光技术; 在线检测; 多传感器; 焊接

中图分类号: TG456.7; TP212.1 文献标识码: A

## Design of multi-sensor on-line monitoring system for laser welding

WANG Chunming, HU Lunji, HUXi-yuan

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

**Abstract** To improve the reliability of the real-time monitoring for laser welding, a multi-sensor signal sampling and processing system was built based on LabVIEW, a virtual instrument development tool. Three signals of audible sound (20Hz~20kHz), plasma optical emission (400nm~500nm), and infrared emission (1200nm~1600nm) during the laser welding process were picked up and analyzed. Correlation analysis of the three signals shows that the two optic signals are synchronous and the audible sound signal is hysteresis to the optic signal. The hysteresis time is just equal to the sound transferring from welding point to sensor, which proved the validity of the three detecting signals. Two examples show that the reliability of multi-sensor monitoring is higher than single sensor monitoring. So, the multi-sensor detecting and signal fusion is the developing direction for the laser welding monitoring in the future.

**Key words** laser technique; on-line monitoring; multi-sensor; welding

## 引 言

激光焊接以其能量密度高、焊缝深宽大、线能量输入小、变形小、生产效率高、易于自动化比等优点, 同时具有良好的材料适应性, 可对高熔点、高硬度、高脆性等常规方法难以焊接的材料进行焊接, 因而在汽车、冶金、航空航天和国防工业等领域得到了日益广泛的应用。在高效率高质量的激光焊接生产中, 焊接过程和质量的实时监测对于保证产品质量具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来, 国内外众多学者开展了大量关于激光焊接质量实时监测的研究及其实用化方面的工作, 然而迄今为止, 该领域的研究成果在可靠

性、普适性和功能性等方面仍然不能较好满足实际生产的需要, 这一领域仍然是各国学者研究的热门课题。

## 1 多传感器监测系统的设计

按照虚拟仪器的理念设计了一套激光焊接过程多传感器实时监测系统, 设计过程中尽可能简化硬件功能以提高其可靠性与抗干扰能力, 而将系统的核心转移到软件部分, 一方面可以大大提高系统针对不同应用的适应性和可移植性, 另一方面可节省成本。整个监测系统由 3 部分组成: 信号拾取、信号调理、数据采集和分析。

### 1.1 信号拾取

信号拾取部分由传感器以及传感器装夹装置组成, 其作用是准确获取高速激光焊接过程中能够反映焊接质量的有效信息。信号拾取部分处于整个系统的最前端, 所获取的任何信号都会被后端进一步的放大, 因此, 保证该部分获取信息的准确性与有效性至关重要。

在激光深熔焊过程中, 存在众多的光、声、电信号,

作者简介: 王春明 (1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料激光加工及其过程在线检测方面的研究。

Email: cmwang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-07-25; 收到修改稿日期: 2006-11-03

在这众多的信号中都或多或少的包含有反映焊接过程和质量的信号,必须选取其中最有效并易于检测到的信号,并运用合适的传感器将其转换为电信号进行采集和分析。

根据文献调研<sup>[6-8]</sup>和课题组前期工作<sup>[9-12]</sup>,选取激光焊接过程中的可听声音(20Hz~20kHz)、等离子体蓝紫光(400nm~500nm)和红外辐射(1200nm~1600nm)等3种信号作为被检测信号。

可听声传感器采用灵敏度高、方向性强的驻极体传声器,成本低,其放大电路成熟简单;蓝紫光传感器采用波长相应范围为190nm~1100nm的硅光电二极管,结合滤光片,获取400nm~500nm的等离子体蓝紫光辐射;红外辐射传感器选用InGaAs PN光电二极管,波长响应范围为900nm~1700nm,其结电容小而结电阻很高,因此具有很高的响应速度和低的噪声,同样需要配合适当的滤光片以获取所需较窄波段范围的红外辐射信号。

对于激光焊接过程监测而言,传感器的装夹定位非常重要,一方面需要准确地采集到信号,另一方面又不能对焊接头或激光传输光路造成不良影响或过多的负担,尤其是采用多传感器的情况下。声传感器对距离和方向不很敏感,装夹定位较为容易,此处不作讨论;对于光传感器而言,安装方式有两种:即偏轴采集和正轴采集,研究中采用采用可灵活调节角度的偏轴采集方式,如图1所示。

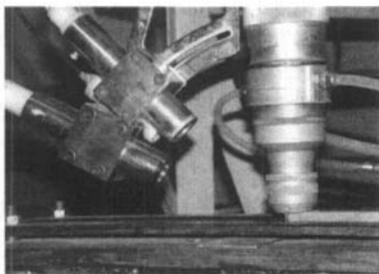


Fig 1 The installing unit for external sensors

## 1.2 信号调理

信号调理主要实现两方面的功能:放大和滤波。

从传感器获得的电流或电压信号幅值很低,一般为毫安或毫伏级,如此微弱的电信号显然不适合传送和采集,因此,信号调理电路的首要任务就是将传感信号转换或放大到合适的电压大小以利于传送和采集。

激光焊接一般在较为复杂的工业环境下进行,存在较多的光、电、磁以及声等多方面的干扰,因此,信号调理电路的另一个重要功能是滤除前端的干扰和噪声。对于不同的信号源,信号的有效频段和干扰来源不同,其滤波器的设计需要根据实际情况分别对待,对于光信号采用低通滤波,声信号可采用带通滤波取出某一段

频率的信号进行分析;另外,根据采样定律,对于频率高于采样频率一半的信号成分经A/D转换后不可能被还原,因此在数据采集前必须进行抗混频滤波。

根据以上要求,设计的信号调理电路总体功能见图2。

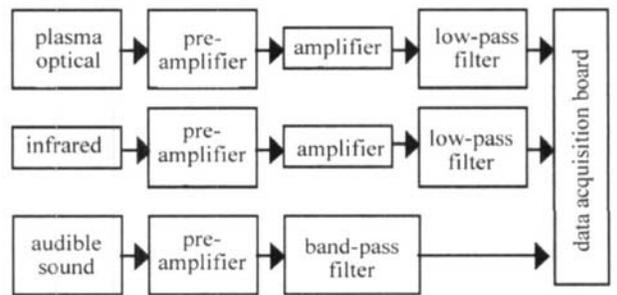


Fig 2 The signal conditioning flow chart

## 1.3 数据采集与分析

数据采集硬件采用美国国家仪器公司(national instrument NI)的数据采集卡PCF6023E,最多可实现16通道、200kHz采样频率的信号采集。

软件开发是基于NI的虚拟仪器开发平台LabVIEW进行的,软件界面如图3所示。

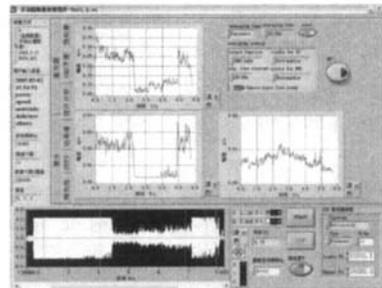


Fig 3 The interface of data analyzing software

可实现3个通道信号的高速A/D转换与数据存贮,单通道信号的采样频率可达80kHz。数据分析具有平滑处理、重新采样、统计分析、功率谱估计、相关分析、数字滤波、连续短时傅里叶变换等功能。

## 2 检测信号的相关性分析

对于两个不同的随机变量 $x(t)$ 和 $y(t)$ ,其相关函数描述了两个过程间的依赖关系,即 $x(t)$ 与 $y(t+\tau)$ 的相关性,相关函数的数学表达式为 $R_{xy}(t) = x(t) \otimes y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)y(t+\tau)d\tau$ 两信号的互相关函数一般不是偶函数,其峰值点与纵坐标的距离,反映了函数 $x(t)$ 与 $y(t)$ 在错开多大时间间隔最相似或相关程度最高。对3种信号进行两两互相关分析,见图4~图6。

从图中可看出,对于蓝紫光、红外以及可听声3种信号,任何两种信号的互相关函数在0时刻附近都存在一个显著的峰值,但又有些不同。蓝紫光信号与红

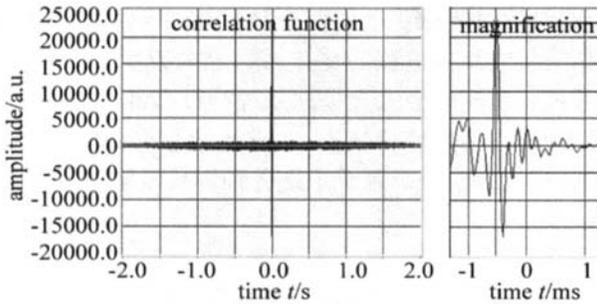


Fig 4 The correlation for audible sound and plasma optical signal

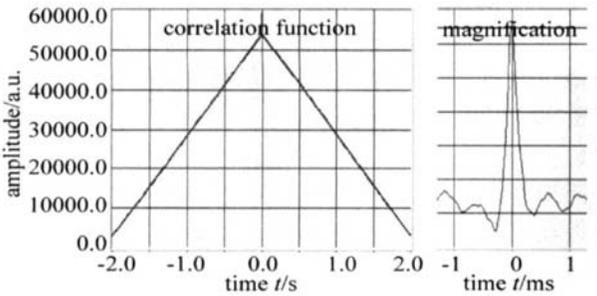


Fig 5 The correlation for plasma optical and infrared signal

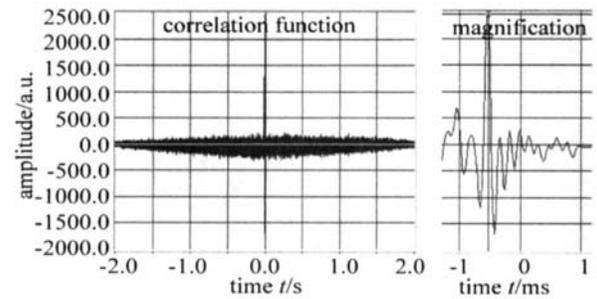


Fig 6 The correlation for audible sound and infrared signal

外信号刚好在 0 时刻相关性最好,说明当焊接过程变化引起信号改变时,二者的波动是同步(并非完全一样,只是变化步调相同或相似)的;可听声信号与两路光信号的互相关函数都是在  $-0.000525\text{s}$  处相关性最好,而不是在 0 时刻处,说明当焊接过程引起信号波动时,采集的声信号变化要滞后于两路光信号  $0.000525\text{s}$ 。之所以如此,是由于光的传播速度远远大于声速,声信号从焊接区域传播到声传感器需要一定时间,经过计算,  $0.000525\text{s}$  时间声传播的距离为  $178.5\text{mm}$ ,大致等于声传感器与焊接过程中熔池的距离,所以采集的声信号要滞后于蓝紫光及红外辐射信号。

上述相关性分析进一步论证了所采集的 3 路信号的有效性。

### 3 多传感器在线检测系统的测试

通过两个实例对所设计的激光焊接过程多传感器在线检测系统的可靠性进行了进一步测试,具体如下。

#### 3.1 实例 1

当激光功率密度刚刚达到能够进行深熔焊时,外

界的极小干扰或改变都可能使焊接过程在热传导焊和深熔焊两种焊接模式之间变换。如图 7 所示,焊缝是



Fig 7 The front side of weld seam under critical power density

在激光功率为  $1000\text{W}$ 、焊接速度为  $1.4\text{m/m in}$ 、侧吹气流量为  $0\text{m}^3/\text{h}$  的情况下获得的,整条焊缝在焊接过程中工艺参数都未改变,但焊缝共分 4 段:两段热传导焊缝、两段深熔焊缝,对应的 3 种信号如图 8 所示。从

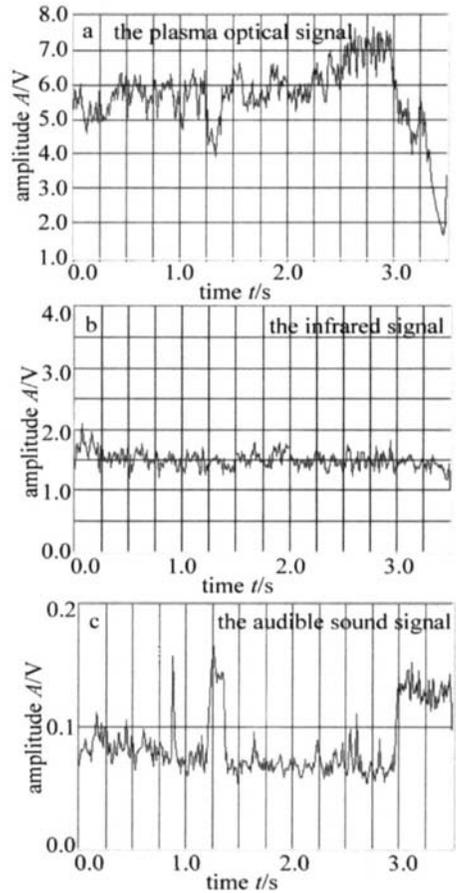


Fig 8 The three signals' waveforms under critical power density

图 8 中可以看出,蓝紫光信号和可听声信号能够较好地反映焊接过程是热传导焊还是深熔焊。蓝紫光信号的均方根值在焊接过程从热传导焊转为深熔焊时显著降低;可听声信号的变化则相反,其均方根值从热传导焊转化为深熔焊时则显著升高;但红外信号在整条焊缝上都没有显著变化,并未反映焊接过程本质的变化。

另外,在可听声信号的  $0.75\text{s} \sim 1.0\text{s}$  波形中有一个明显尖峰,但观察此段焊缝并无异样,因此可能是外界干扰引起的,此现象也说明仅依靠一种信号进行监测的可靠性不高。

#### 3.2 实例 2

在激光功率为  $P = 1500\text{W}$ 、焊接速度  $v = 1.4\text{m/m in}$ 、侧吹气流量为  $1.0\text{m}^3/\text{h}$  的情况下对一两端低、中

间高的弧形板(见图9)进行了焊接,弧形板中间比两端高出约0.8mm,即焊接过程中离焦量的变化约0.8mm。观察整条焊缝,焊缝正面熔宽两端与中间并无明显区别,但焊缝背面两端的熔宽略为大于中间的焊缝熔宽。

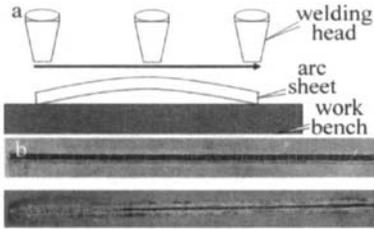


Fig 9 The arc sheet and the weld seam

a—the arc sheet for welding b—the weld seam for the arc sheet

图10为对应整条焊缝的蓝紫光、红外、可听声等3种信号的波形,从图中可看出,蓝紫光与红外辐射信号可以较好地反映弧形板的弧度变化,但声信号无明显变化,不能反映弧形板的弧度波动,可见仅依靠单纯的声信号检测是不能反映这种焊接过程的波动状况的。

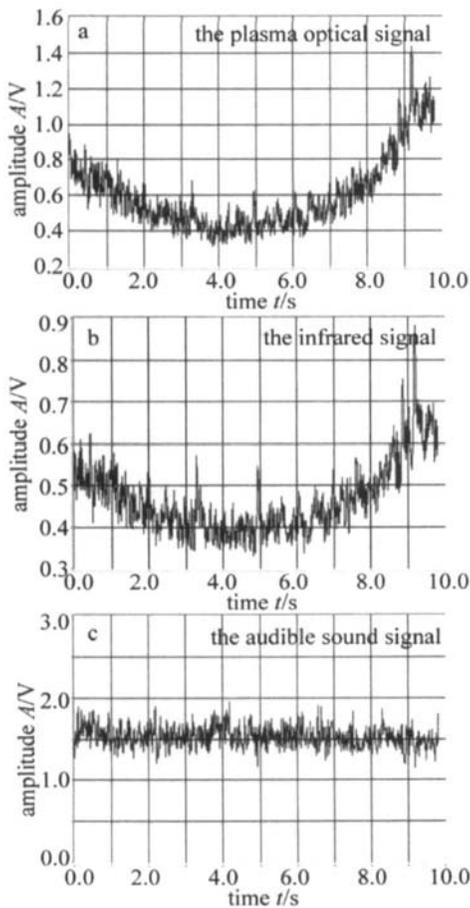


Fig 10 The three signals' waveforms when welding arc sheet

分析以上两个实例,可以看出所设计的多传感器检测系统能够准确反应激光焊接过程和质量的变化;另外,上述两个实例还说明,对于激光深熔焊过程的监

测,有时候仅依靠一个或两个传感器并不能获取足够信息来反映焊接过程的变化,采用多传感器采集信号对其进行监测将会大大提高系统的可靠性。如果进一步结合现代信息融合技术,对多传感信号进行有效融合,必将进一步提高系统识别各种焊接缺陷的可靠性。

## 4 结 论

(1)按照虚拟仪器理念设计了一套激光焊接实时监测系统,硬件部分尽可能简化以提高其可靠性,软件部分集中了系统的主要功能,由其实现高速信号采集与多功能数字信号分析。(2)信号的相关性分析验证了所采集的可听声、蓝紫光、红外辐射等3路信号的有效性。(3)焊接过程波动引起信号变化时,两路光信号同步变化,声信号的变化滞后于两路光信号,其主要原因在于声速较慢,从焊接区传播到传感器需要一定的时间。(4)多传感器信号监测的可靠性高于单信号监测。

## 参 考 文 献

- [1] LI L. Modern laser materials processing technology and equipment [M]. Beijing: Beijing Polytech University Press, 1993: 200~201 (in Chinese).
- [2] CAO B Q, ZENG X Y. Review of patents in laser processing in China and America [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 346~351 (in Chinese).
- [3] ZHOU Y Y, HU Ch K, CHEN P F. The laser welding of the double-linked gear in automobile gearbox [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 445~448 (in Chinese).
- [4] FANG D, YU Sh R, ZHANG J B. The present and development for laser welding [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 19(1): 15~18 (in Chinese).
- [5] TONG X. The character and application of laser welding [J]. Welding Technology, 2000, 29(3): 11~12 (in Chinese).
- [6] SUN A, KANNATEY-ASIBU E, Jr. Sensor systems for real-time monitoring of laser weld quality [J]. Journal of Laser Application, 1999, 11(4): 153~166.
- [7] GU H, DULEY W W. Acoustic emission and optimized CO<sub>2</sub> laser welding of steel sheets [A]. The International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics [C]. Florida: SPIE, 1994: 77~85.
- [8] SMUROV M, BERTRAND I, GREVEY P. Application of near infrared pyrometry for continuous Nd:YAG laser welding of stainless steel [J]. Applied Surface Science, 2000, 168(4): 182~185.
- [9] LIU H. The principles and technology of defect diagnosis in laser welding of thin sheets [D]. Wuhar: Huzhong University of Science and Technology, 1998: 56~68 (in Chinese).
- [10] DUAN A Q, ZOU Sh K, HU L J. Using plasma acoustic emission to monitor the penetration status for laser welding [J]. Electromechanical & Material, 2001(6): 6~8.
- [11] LIU H, HU L J, HU X Y. Fast Fourier analysis of optical and acoustic signals at poor penetration in laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(6): 32~38 (in Chinese).
- [12] ZHU Q Y, WU S P, HU L J. Coaxial real-time monitoring of gap defect in CO<sub>2</sub> laser welding process [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 455~461 (in Chinese).