

# 多传感器信息融合技术在焊接中的应用及展望

陈善本, 陈波, 马宏波, 林涛

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对单一传感器在提取全面反映焊接过程质量信息上的不足, 提出了基于多传感器信息融合技术获取焊接过程状态信息思想。介绍了信息融合理论及常用的信息融合算法, 分析了焊接过程中使用的各种传感器, 描述了当前信息融合理论在焊接过程中的应用情况, 展望了信息融合技术在焊接过程中的应用前景。

**关键词:** 信息融合; 焊接质量; 多传感器

**中图分类号:** TG409

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1001-2303(2009)01-0058-06

## Applications and prospects of multi-sensor information fusion technology in welding process

CHEN Shan-ben, CHEN Bo, MA Hong-bo, LIN Tao

(Material and Engineering College, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** Aiming at the deficiencies of single sensor in obtaining roundly information about welding quality, this paper proposed the idea of acquiring welding status information based on multi-sensor information technology. The paper introduce the general principle of multi-sensor information fusion and common used fusion algorithms, and analyzed the various welding sensors, then introduced the application conditions of multi-sensor information in welding process, and finally forecasted the application prospects of multi-sensor information in welding processes.

**Key words:** information fusion; welding quality; multi-sensor

### 0 前言

焊接质量控制一直是焊接界学者致力研究的重要课题, 要实现焊接过程质量的准确控制, 首先需要获得描述焊接过程状态的准确信息, 由此, 发展出各种焊接过程传感器, 如电弧传感器、视觉传感器、温度传感器、超声波传感器等。但由于焊接过程是一个多变量、非线性、时变的强耦合过程, 焊接过程中伴随着强烈的声、光、电、强电磁等强干扰因素, 每种传感器在获得全面的、有效的反映焊接过程状态的信息方面都存在一定的不足之处, 获得的都是描述焊接过程状态的某一方面的信息, 不能全

面准确的对焊接过程状态进行描述。

目前, 采用机器人焊接已成为焊接自动化技术现代化的主要标志, 在焊接生产中采用机器人技术, 可以提高生产率、改善劳动条件、稳定和保证焊接质量、实现小批量产品的焊接自动化。当前国内大量应用的焊接机器人系统的焊接路径和焊接参数是根据实际作业条件预先设置的, 在焊接时缺少外部信息和实时调整控制功能, 这类焊接机器人对焊接作业条件的稳定性要求严格, 焊接时缺乏“柔性”, 表现出明显的缺点。在实际焊接过程中, 焊接条件是经常变化的, 如加工和装配的误差会造成焊缝位置和尺寸的变化, 焊接过程中工件受热及散热条件的改变会造成焊道变形和熔透不均。为了克服机器人焊接过程中各种不确定因素对焊接质量的影响, 提高机器人作业智能化水平和工作可靠性, 要求弧焊机器人系统不仅能实现空间焊缝的自动实时跟踪, 而且还能实现焊接参数的在线调整和焊缝质量

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874026); 上海市自然科学基金项目(08ZR1409900)

作者简介: 陈善本(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人焊接智能化、焊接动态过程智能控制和不确定系统鲁棒控制理论方向及其学科交叉领域的学术研究。



的实时控制。要实现该功能,首先需要使用各种传感器获得焊枪相对于焊缝的位姿、焊接参数、焊缝质量等信息,而所有这些信息的获取靠单一传感器难以实现,需要使用不同的传感器分别获取相应的信息,并根据获得的信息调整参数,从而实现对空间焊缝自动跟踪和焊缝质量的精确可靠控制<sup>[4]</sup>。

信息融合技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一门新兴学科。信息融合是指把多个相同类型或不同类型的传感器所提供的局部观测量加以综合,消除信息之间的冗余和矛盾,利用信息的互补,形成对环境的相对完整一致的感知描述,从而提高智能系统决策的快速性和正确性,以及规划的科学性<sup>[5]</sup>。信息融合技术最早应用于军事领域,用于融合军事中的红外、雷达、遥感、激光等各种传感器所获得的信息,通过优化处理,实时发现目标,获取目标的状态估计,分析敌人的行为意图,从而做出态势评估和威胁分析,进而做出相应的决策。近年来,信息融合技术逐渐扩展到民用领域,现已成功应用于导航、自动目标识别、多目标跟踪、机器人、图像处理、复杂工业过程控制等领域。

将信息融合技术应用于焊接领域,已有部分学者进行了研究,且取得了一定的效果,但由于信息融合技术是一个新发展起来的领域,尚未形成统一的融合模型和融合算法,因此,目前所用的信息融合模型都是针对特定领域中的特定问题,在焊接过程中的所有信息融合模型,也都是针对具体的焊接工艺和焊接条件,存在一定的局限性。在此将对焊接过程中的传感情况及信息融合技术进行详细的介绍,探讨如何将多传感器信息融合技术进一步应用于焊接过程中,从而对焊接过程做出更加全面准确的描述,进而对焊接质量进行更准确的控制。

### 1 信息融合简介

多源信息融合技术是研究对多源不确定性信息进行综合处理及利用的理论和方法,即对来自多个信息源的信息进行多级别、多方面、多层次的处理,产生新的有意义的信息。信息融合最早应用于军事领域,是组合多源信息和数据完成目标检测、关联、状态评估的多层次、多方面的过程。这种信息融合的目的是获得准确的目标识别、完整而及时的战场态势和威胁评估。

随着传感器技术、计算机科学和信息技术的发展,各种面向复杂应用背景的多传感器系统大量涌

现,使得多渠道的信息获取、处理和融合成为可能,并且在诸多领域,人们都认识到把多个数据源中的信息综合起来能够提高工作的成绩。因此,多源信息融合技术在军事领域和民用领域得到了广泛的重视和成功的应用,其理论和方法已成为智能信息处理及控制的一个重要研究方向,近年来信息融合技术在基本理论和实现方法上得到极大的完善,显示出自身极大的优越性<sup>[6]</sup>,主要表现在:容错性好;系统精度高;信息处理速度快;互补性强;信息获取成本低等方面。

对于多传感器的信息融合,目前学者们普遍接受三级融合结构,即数据级、特征级和决策级,如图 1 所示。数据层融合将传感器的观测数据直接融合,然后从数据中提取特征向量并进行判断识别,它要求所有传感器是同质的。特征层融合首先从每个传感器的观测数据中提取出代表特征,然后对特征进行融合,传感器可以是异质的。决策层融合在每个传感器做出决策后,将每个传感器的决策结果进行融合。

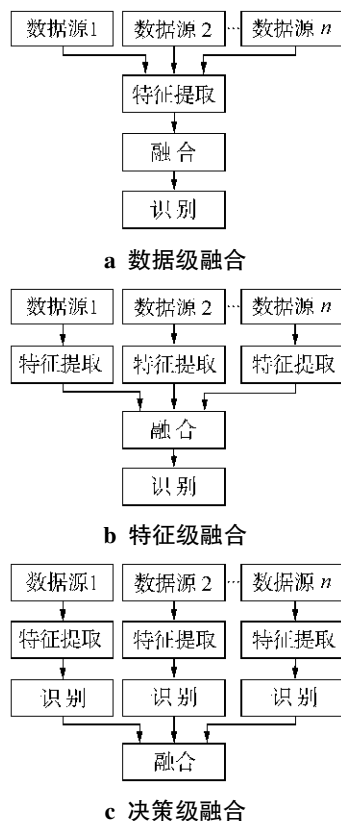


图 1 多传感器信息融合的三种层次结构

### 2 焊接过程的传感技术

焊接过程的传感器是实现焊接过程质量控制的关键环节。未来焊接发展的趋势是焊接自动化、机

专题讨论  
名家新作  
爱心奉献

机器人化及智能化,而传感技术是这一发展中的最重要的部分。多传感器信息融合协调利用多个传感器,通过对各传感器获得的未知环境特征信息的分析和综合,得到对环境全面、正确的估计,它避免了单一传感器的局限性,可以获取更多的信息,得出更为准确、可靠的结论。目前应用于焊接过程的传感器主要有:电弧传感器、视觉传感器、声音传感器、温度传感器等。

## 2.1 电弧传感器

焊接过程中,焊接电压、电流等参数直接影响焊缝的成形过程。因此对焊接过程中电压电流的研究开始较早。文献[7]使用电弧传感器获得了焊接过程中的电压、电流信息,研究了焊接信号与焊接过程稳定性间的关系。文献[8]首先获得电压、电流信息,然后使用因子设计法及神经网络建立电参数与熔池几何尺寸直接的关系模型,并利用求得的模型对焊缝几何形状进行了预测。文献[9]研究了电弧电压对堆焊焊缝金属显微组织及硬度的影响规律,得出电弧电压对埋弧自动焊焊缝组织和焊缝硬度的影响情况。

## 2.2 视觉传感技术

对于焊接过程,视觉传感是一种非接触式的传感形式,其主要优点是不接触工件,不干扰正常的焊接过程,获取的信息量大,通用性强。视觉传感在焊接中的应用包括离线确定被焊工件的位置;在线补偿由于固定精度、机器人各部分的容差、焊接过程中的焊件变形引起的焊接路径偏差;焊接过程中的焊接接头和熔池几何形状的实时传感;熔滴过渡形式的监测等。近年来,随着计算机视觉技术的发展,利用机器视觉正面直接观察焊接熔池,通过图像处理获取熔池的几何形状信息对焊接质量进行闭环控制,已成为重要的研究方向<sup>[10-11]</sup>。根据视觉检测系统中成像光源是辅助光源还是焊接区自身产生的光源,直接视觉检测系统可分为主动式和被动式两大类。

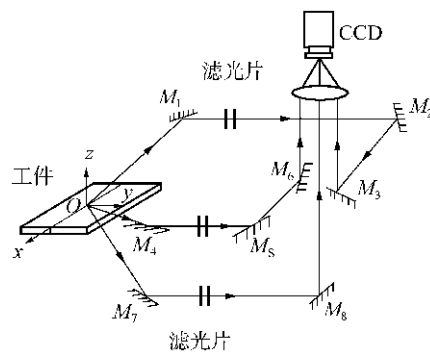
### (1) 主动式直接视觉传感。

为了减少弧光对图像质量的影响,主动式直接视觉检测方法采用激光等辅助光源对焊接区进行人工照明以提高图像的质量<sup>[12-13]</sup>。由于激光具有单波长、方向性好、相干性好等特点,所以采用激光作为辅助光源可以获得较清晰的图像。主动视觉由于其所需设备昂贵,系统复杂,常常限制了其应用推广。

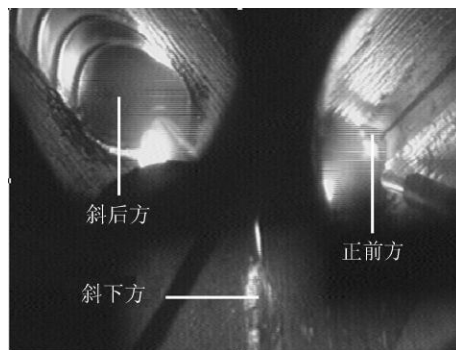
### (2) 被动式直接视觉传感。

被动式视觉传感不需要另加辅助光源,直接用弧光本身照明焊接区。文献[14]针对铝合金填丝

脉冲 GTAW,设计了三光路同时同幅传感系统(见图 2a),能够从熔池正前方、斜后方和斜下方三个方向同时同幅获取熔池图像(见图 2b)。并对图像二维特征尺寸进行了较深入的研究。



a 多光路原理



b 熔池图像

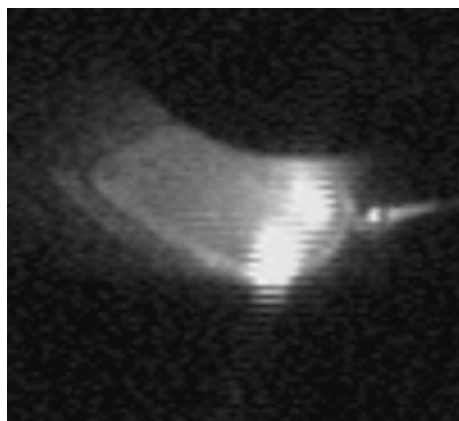
图 2 多光路试验系统及熔池图像

文献[15]根据提取的熔池图像特点开发出由熔池图像提取熔池三维形状参数的图像处理算法,使用阴影恢复形状算法可以根据获得的熔池图像计算出熔池表面高度(见图 3),能够很好地应用于焊接过程熔池三维信息的实时提取中。

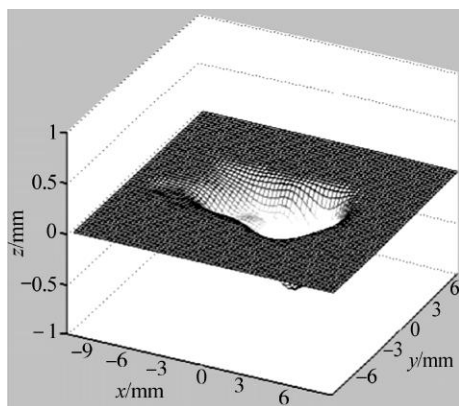
## 2.3 声音传感器

在弧焊过程中,伴随着电弧声的产生,焊接电弧声信号中同样蕴涵着丰富的焊接状态信息,并与焊接参数、电弧行为、熔滴过渡方式、过程稳定性等密切相关,是焊接质量监控重要的源信号。文献[16]指出,在焊接期间金属熔化引起的声发射是稳定的,并且声发射的有效值是一定的,与焊接电流、通电时间和熔化金属的体积呈一定的函数关系。如果焊接期间出现了不稳定的大振幅声发射,有大量的能量与周围环境进行交换,这就证明其偏离了正常焊接工艺参数,需要采取有效的控制措施,调整焊接工艺参数。国内外有些学者试图利用电弧声作为检测及控制焊接过程的信息量,并在这方面进行了研究<sup>[17-18]</sup>。





a 熔池图像



b 熔池表面高度计算结果

图3 阴影恢复高度计算熔池表面高度

## 2.4 温度传感器

焊接时焊件上的熔池和周围的表面温度与焊缝背面熔宽之间有一定的对应关系,从焊接温度场的分布规律知道,当焊接达到稳定的热动态平衡后,焊件上的温度分布不再发生大的变化,在一定的热输入状态下,一定的热温度场分布对应着熔池的几何尺寸,它可以反映焊缝的熔化程度<sup>[9]</sup>,可以通过检测熔池温度场的变化控制焊缝的熔透程度。

## 2.5 熔池振动传感器

文献[20]对熔池振荡现象的研究表明,熔池自然振荡频率与熔池尺寸具有良好的对应关系,文献[21]提出了TIG焊熔池外激谐振控制熔透的方法,其基本原理是利用附加脉冲电流引起熔池谐振,再提取熔池谐振时电弧电压变化部分作为熔池谐振和熔透控制信号,当固定激振频率与熔池的振荡频率相同时,熔池的振幅最大,此时电弧电压的交流分量幅值也最大。该方法已实现了薄钢板TIG焊的熔透实时控制。

## 3 信息融合方法

作为多传感器融合的研究热点之一,融合方法一直受到人们的重视,这方面国外已经做了大量的研究,并且提出了许多融合方法。目前,这些方法大致可分为三类:基于最小二乘法的融合方法、基于随机模型的融合方法和基于人工智能的融合方法。

### 3.1 基于最小二乘法的融合方法

基于最小二乘法的融合算法主要包括卡尔曼滤波方法和最优理论。卡尔曼滤波融合算法利用测量模型的统计特性,递推确定在统计意义下最优的融合估计,适用于线性系统的目标跟踪,并且一般适用于平稳的随机过程,它要求系统具有线性的动力学模型,且系统噪声和传感器噪声都是高斯分布的白噪声模型。使用卡尔曼滤波器进行数据融合有两种途径:集中式卡尔曼滤波和分散式卡尔曼滤波。集中式卡尔曼滤波指使用一个卡尔曼滤波器对所有的数据进行融合,分散式卡尔曼滤波首先使用各个独立的分卡尔曼滤波器对每个传感器的数据进行滤波处理,然后使用一个主卡尔曼滤波器对各个滤波器的结果进行融合。

### 3.2 基于随机模型的融合方法

在多传感器融合中,常采用的基于随机模型的融合方法包括:贝叶斯推理、证据理论、鲁棒估计、递推算子以及其他变形方法。

贝叶斯推理方法把每个传感器看作是一个贝叶斯估计器,用于将每一个目标各自的关联概率分布综合成一个联合后验分布函数。D-S证据理论是一种广义的贝叶斯推理方法,它通过集合表示命题,把对命题的不确定性描述转化为对集合的不确定性描述。D-S证据理论可以不需要先验概率和条件概率密度,并且能将“不知道”和“不确定”区分开。

### 3.3 基于人工智能的融合方法

基于人工智能的信息融合算法包括神经网络、模糊系统和专家系统等方法,以及近几年发展起来的支持向量机、小波理论等方法。

#### (1)神经网络。

神经网络具有很强的容错性以及自学习、自组织及自适应能力,能够模拟复杂的非线性映射,这些特性恰好满足了多源信息融合技术处理的要求,因此,神经网络在信息融合中的应用日益受到重视。

#### (2)模糊逻辑。

由模糊集理论发展起来的模糊信息处理技术,



往往能以简便而有效的方式给出信息的不确定性推理过程,从而为信息处理技术提供一种探索和模拟人的识别机理的途径。模糊逻辑推理将多传感器信息融合过程中的不确定性直接表示在推理过程中,是一种不确定推理过程,此方法首先对多传感器的输出模糊化,将所测得的物理量进行分级,用相应的模糊子集表示,并确定这些模糊子集的隶属函数,每个传感器的输出值对应一个隶属函数;然后通过一种融合算法将这些隶属函数进行综合处理;最后将结果清晰化,求出非模糊的融合值。

### (3)支持向量机。

SVM 具有更严格的理论和数学基础,它通过求解二次规划问题得到问题的全局最优解,不存在局部极小点及过拟合问题。文献[22]利用支持向量机融合了机器人抓举过程中 6 个力矩、4 个短距离传感器和 1 个长距离传感器的信息对机器人的抓举状态进行判断,实验结果表明,支持向量机能够很好地解决机器人手爪数据融合问题。

### (4)小波理论。

小波变换是一种时频分析方法,它在多信息融合中主要用于图像融合,即把多个不同模式的图像传感器得到的同一场景的多幅图像,或同一传感器在不同时刻得到的同一场景的多幅图像,合成为一幅图像的过程<sup>[23]</sup>。

以上各种算法对信息类型、观测环境都有不同的要求,且各自存在优缺点,在具体应用时需根据系统的实际情况综合运用。对于焊接过程的多传感器信息融合,应在参考其他传感器信息融合模型及算法的基础上,建立符合焊接过程的多传感器信息融合模型及算法。

## 4 信息融合技术在焊接中的应用

目前,已有部分学者认识到仅靠单一传感器无法获得全面准确反映焊接过程状态的信息,从而在焊接过程中采用不同的传感器从不同的侧面获取焊接过程的状态信息,然后使用多传感器信息融合技术将其融合处理,获得了比单一传感器更加精确的描述焊接状态的融合信息。

文献[24]采用多传感器融合控制点焊质量的思想,融合点焊过程中的焊接电流、焊接时间、电极位移、电极间动态电阻四个参数信息,采用结合法、决策法以及平均法相结合的最优融合方法对多传感器提供的特征信息进行融合处理,实现了点焊过程

的热量调节和时间调节。文献[25]基于点焊焊接过程电极位移、动态电阻信号的同步采集和特征分析,从两种信号中提取若干特征参量,依据特征参量与焊点接头抗剪切力间的相关性分析结果,选取特征参量建立数据集,利用多元线性、非线性、支持向量机统计分析方法实现多信息融合,构建焊接过程监测参量与焊点强度之间的回归映射模型,进而实现对未知焊点样本强度的预测。文献[26]使用电压、电流、电极压力及超声传感器实时检测点过程中的电压、电流、电极压力及电极磨损参数信息,然后使用神经网络融合获得的参数信息,实时对点焊过程中的熔核尺寸进行预测,试验结果表明,融合后的融合尺寸误差为 $\pm 0.15$  mm。文献[27]使用多传感器采集激光焊接过程中的可听声、蓝紫光和红外辐射信号,然后提取三路信号的均方根值及 2 000~3 500 Hz 特征频段信号的均方根值六个特征信号,采用模拟退火算法对信号特征进行组合优化和关联融合,并以 BP 网络为框架构建了识别熔透状态的模式分类器,对熔透状态的识别准确率达到 88%以上。文献[28]采用最优加权与递推最小二乘法相结合的多传感器融合算法将各个传感器获得的焊枪偏离焊缝的偏差信息进行融合处理,得到一个近乎无干扰的偏差信息,然后控制算法根据该偏差信息得到控制信号并执行相应的纠偏动作。仿真试验表明,采用多传感器融合的控制效果优于单一传感器的控制效果。

## 5 结论

从目前的研究情况来看,针对焊接过程的多传感器信息融合研究刚刚展开,并表现出一定的优势。但是目前存在的几种焊接过程多传感器数据融合系统所用传感器种类相对单一,使用的融合算法也较为简单,仍不能对焊接过程状态做出全面准确的反映。随着传感器技术和信息融合技术的发展,使用多传感器技术从不同的方面获取焊接过程的信息,然后使用更加合理的、易于理解的融合算法将其融合并充分利用,建立适用于焊接过程的多传感器信息融合模型,将有助于对焊接过程做出更加准确全面的描述,进而对焊接质量进行更加精确的控制。可以预见,多传感器信息融合技术将在焊接过程实时监测及质量控制中得到更为广泛充分的应用,提高焊接过程自动控制的水平。

## 参考文献:

- [1] Tam T J, Chen S B, Zhou C J. Robotic Welding, Intelligence



- and Automation[R].Germany:Springer-Verlag 2007.
- [2] Chen S B, Wu J.Intelligentized Methodology for Arc Welding Dynamical Process[R].Germany:Springer-Verlag, 2008.
- [3] Chen S B.On the Key Technologies of Intelligentized Welding Robot[J].Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2007(6):105-116.
- [4] Chen S B.Visual information acquirement and real-time control methodologies for weld pool dynamics during pulsed GTAW [A].The invited paper of the THERMEC'2006[C].Materials Science Forum, 2007:539-543.
- [5] 罗志增,蒋静坪.机器人感觉与多信息融合[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [6] 王耀南,李树涛.多传感器信息融合及其应用综述[J].控制与决策,2001,16(5):518-522.
- [7] 薛海涛,李俊岳,张晓囡,等.焊接电弧信息测试分析系统[J].焊接学报,2003,24(1):19-22.
- [8] 黄石生,李迪.焊接过程的神经网络建模及控制研究[J].机械工程学报,1994,30(3):24-30.
- [9] 杨坚.电弧电压对埋弧自动堆焊焊缝的影响[J].吉林电力技术,1997(5):19-21.
- [10] Chen Shan Ben, Wu Lin, Wang Qi Long, *et al.*Self-learning fuzzy neural network and computer vision for control of pulsed GTAW[J].Welding Journal, 1997, 76(5):201-209.
- [11] Kovacevic R, Zhang Y M, Li L.Monitoring of weld joint penetration based on weld pool geometrical appearance:The geometrical appearance of the weld pool contains sufficient information to determine full joint penetration in GTAW[J].Welding Journal (Miami, Fla), 1996, 75(10):317.
- [12] Agapakis J E, Bolstad J.Vision Sensing and Processing System for Monitoring and Control of Welding and Other High Luminosity Processes[R].International Robots&Vision Automation Conference, 1991:23-29.
- [13] 张裕明.TIG 焊熔透正面视觉自适应控制的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1990.
- [14] Fan C, Lv F, Chen S.Visual sensing and penetration control in aluminum alloy pulsed GTA welding[R].International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008:1-12.
- [15] 杜全营.填丝脉冲 GTAW 熔池三维特征实时提取与智能控制[D].上海:上海交通大学材料学院,2006.
- [16] 伊万诺夫,别洛夫.焊接和焊接接头的声发射检测[M].[出版地不详],1986.
- [17] Arata Yoshiaki.Investigation on welding arc sound-Vibration analysis of base metal during welding[R].Transactions of JWIR, 1981.
- [18] 罗震,胡绳荪,单平,等.用时频分析法研究铝合金电阻点焊过程中的声音信号[J].焊接学报,2004,25(1):36-39.
- [19] 廖平,杨文杰,王伟.焊缝熔透检测及控制的国内外发展概况[J].佳木斯工学院学报,1997,15(3):12.
- [20] Renwick R J.Real-time control of GAT weld size by controlling pool oscillation frequency[R].CWR technical report, 1983.
- [21] 杨春利.薄钢板 TIG 焊电弧传感熔池谐振法熔透实时控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1990.
- [22] 王晨,赵杰,臧希,等.一种基于支持向量机的数据融合方法的研究[J].机械与电子,2004(8):8-11.
- [23] 晃锐,张科,李言俊.一种基于小波变换的图像融合算法[J].电子学报,2004,32(5):750-753.
- [24] 常云龙,薛家祥,黄石生.机器人点焊多信息融合及控制[J].焊接学报,2000,21(2):85-89.
- [25] 张宏杰,张鹏贤,马跃洲,等.基于信息融合技术的焊点质量评估[J].焊接技术,2008,37(3):44-47.
- [26] Cullen J D, Athi N, Al-Jader M, *et al.*Multisensor fusion for on line monitoring of the quality of spot welding in automotive industry[J].Measurement:Journal of the International Measurement Confederation, 2008,41(4):412-423.
- [27] 胡席远,王春明,吴松坪,等.基于多传感器融合的激光焊接熔透状态的识别[J].中国激光,2007,34(4):538-542.
- [28] 刘静,陈小惠.基于多传感器信息融合的焊缝跟踪系统设计[J].舰船电子工程,2006,26(3):117-120.

陈善本,获哈尔滨工业大学控制理论与应用专业硕士和博士学位;作为联合培养博士生曾就读于浙江大学和复旦大学运筹学与控制论专业;2000年4月至今为上海交通大学焊接工程研究所教授、博士生导师、教育部第三批“长江学者奖励计划”特聘教授,受聘于材料加工工程学科。现主要从事机器人焊接智能化技术,焊接动态过程智能控制、材料加工智能化和不确定系统鲁棒控制理论方向及其学科交叉领域的研究。

在上述领域研究曾获国家自然科学基金重点项目、面上项目、国际合作交流项目,以及国防九五规划预研、863、国防基金、教育部和上海市重点项目等20余项资助;在国内外学术期刊、国际会议发表论文200余篇;主要编著出版中英文著作8本;软件著作权5项;申请国家发明专利和软件著作权10余项。

现任美国电气工程师学会高级会员(IEEE Senior Member)、中国焊接学会副秘书长、常务理事、机器人与自动化专业委员会主任等10余项学术任职。



陈善本 教授