

第三届

计算机在焊接中的应用 技术交流会

论 文 集

2000 年 11 月 · 上海

中国机械工程学会焊接学会
中 国 焊 接 协 会

前言

二十一世纪先进制造业的重要特征将是自动控制、机电一体化、信息处理以及现代管理等技术的广泛应用，而计算机则是实现这些技术的主要工具。90年代以来，中国机械工程学会焊接分会和中国焊接协会已经先后成功举办了两届《计算机在焊接中应用的学术与技术交流会》，极大地促进了计算机技术在我国焊接领域的普及和应用水平的提高，受到了广大焊接工作者的欢迎。为此可以相信，在世纪之交举行的第三届《计算机在焊接中的应用技术交流会》，必将更进一步地加快中国焊接事业技术进步的步伐和赶超世界前列的进程。

在广大焊接同仁的共同努力和大力支持下，本次会议共收到来自高等院校、科研院所和企业单位的各类有关论文 60 余篇。这些论文既有主题方向的国内外研究现状和发展趋势的综述，也有专门技术的讨论和生产应用经验的交流，内容不仅涵盖了数值模拟仿真、专家系统、数据库、应用软件、信号检测与处理、设备与质量控制、生产过程管理等许多方面，而且还反映了网络技术和人工智能在焊接领域的最新进展和应用前景。

本次会议受中国机械工程学会焊接分会和中国焊接协会的委托，由焊接分会熔焊工艺及设备专业委员会、计算机应用技术（CAW）专业委员会与中国焊接协会金属结构专业委员会共同组织，在清华大学和上海交通大学具体承办下完成了本论文集的征文和出版。

中国的焊接正处于增强实力、参与竞争、推广应用、迈入先进的关键时期。面对机遇和挑战，全国焊接工作者应该团结合作、奋斗攻关，为推进我国焊接事业的进步，促进国家的繁荣昌盛作出新的贡献。

中国机械工程学会副理事长兼秘书长

目 录

大会报告

01 计算机视觉在焊接中的应用	陈 强 孙振国	001
02 焊接变形和残余应力预测理论与计算—发展及应用前景	汪建华	013
03 焊接过程计算机模拟的新进展	武传松 孙俊生等	020

A. 焊接软件及其应用

01 机器人弧焊过程焊缝质量信息的在线判读	叶 峰 欧阳莹等	030
02 压路机装焊 CAPP 系统	白二平 朱志明等	035
03 新型焊接工艺设计专家系统	魏艳红 李卫东等	040
04 计算机辅助焊接工艺评定可视化软件系统的研究	李宝清 贾安东等	047
05 铬镍不锈钢焊缝组织预测	王 学 李世涛等	052
06 CAPP 的发展现状 & 焊接结构件 CAPP 的开发方法	张崇柯 陈丙森等	056
07 智能点焊专家系统集成策略的研究	陈益平 胡德安等	061
08 用于汽车部件制造的焊接质量数据库	叶 峰 陈富根等	066
09 焊接工艺文件编制与管理系统	杨 松 魏艳红等	071
10 发电厂金属检验数据库管理系统及网页制作	杨永强 方志明	077
11 焊接中的计算机应用软件系统的开发	廖剑雄 王聚幸等	082
12 焊接结构件 CAPP 系统的通用化	白远楠 朱志明等	085
13 焊接材料工艺性能的计算机测定	张 军 Rehfeldt 等	090
14 计算机在焊接工艺和生产管理中的应用	王晋生 陈丽中	094
15 工程部队焊工培训题库	李立新 魏艳红等	097

B. 数值模拟与仿真

01 电阻点焊电极温度场分布的数值模拟	龙 昕 汪建华等	100
02 电阻点焊过程数值模拟的研究与进展	李宝清 单 平等	105
03 陶瓷与金属钎焊复合结构应力与变形的有限元分析与控制	吴爱萍 彭真山等	110
04 管道环焊接接头焊接残余应力的数值模拟	董俊慧 霍立兴等	116
05 十字接头焊接残余应力的有限元计算	陈俊梅 霍立兴等	121
06 焊接过程数值分析中的分段移动热源	赵海燕 鹿安理等	125
07 焊接过程数值分析中焊缝区域材料高温性能的影响	史清宇 赵海燕等	130
08 局部焊后热处理的两类评定准则的研究	汪建华 村川英一等	136
09 三维管接头焊后局部焊后热处理加热宽度准则研究	陆 皓 村川英一等	143
10 焊接接头氢扩散数值模拟(1)	张显辉 谭长琰等	148
11 表面张力作用下 CO ₂ 气体保护焊短路过渡过程的仿真研究	李 桓 邓黎丽等	154
12 GTA 焊接电弧与熔池系统的双向耦合数值模拟	雷永平 史耀武等	161
13 电磁搅拌焊接熔池流体流动行为的研究	王 成 田志凌等	168
14 激光深熔焊接热循环计算与检测	罗 健 吴毅雄等	173

15	客车侧墙结构失稳变形预测方法研究	杨新歧	秦红珊等	177
16	箱形结构焊接残余应力的数值模拟研究	吴爱萍	任家烈等	182
17	液力变矩器焊接变形与应力分析及有限元模拟	魏良武	汪建华	188
18	焊接钢结构梁柱节点抗地震设计形式有限元计算	姚国春	霍立兴等	192

C.检测与控制

01	弧焊机器人焊炬姿态规划系统的研究	陈强	路井荣等	198
02	基于视觉的 TIG 焊接过程模糊控制	高进强	刘新峰等	204
03	短路过渡焊丝干伸长传感器的研究	鲍云杰	朱志明等	210
04	爬行式弧焊机器人激光图像焊缝跟踪系统	蔡志勇	陈茂华等	217
05	真空电子束焊缝自动跟踪控制系统的研究	王希靖		220
06	等离子脉动穿孔焊接双闭环控制系统研究	孙久文	王耀文等	224
07	GMAW 焊接过程监测 Kohonen 神经网络系统	武传松	胡庆贤等	229
08	CO ₂ 弧焊特征参数的检测分析系统	俞建荣	史耀武等	235
09	CO ₂ 焊接电弧信号分析与稳定性的评价	区智明	温贤胤	239
10	CO ₂ 弧焊的一元化自寻优控制	蒋力培	俞建荣等	244
11	电弧喷涂电流的自动控制	张甲英	徐滨士等	249
12	基于 MATLAB 的焊接过程神经网络建模要点分析	赵冬斌	陈善本等	252
13	自动切管机数控系统的研究	李宝清	贾安东等	256
14	白车身装焊车间设备监控与管理系统	韩赞东	彭太辉等	261
15	单片机控制的焊接操作机		刘松青	265
16	三相功率因数校正技术在弧焊逆变电源中的应用	陈树君	殷树言	269
17	微机控制的逆变电阻焊机的研制	张相军	宋雪梅等	273

D.其它

01	复杂汽车零部件精度焊接成形质量保证系统研究	吴毅雄	李铸国	277
02	实时测量焊接变形的系统及应用	蔡志鹏	鹿安理等	283
03	熔化极气体保护焊的高效化研究	殷树言	徐鲁宁等	290
04	发展中的活性化焊接技术		杨春利	298
05	管道下向焊技术及焊机特点		李宪政	304
06	长输管道全位置自动焊接技术	刘守龙	曾惠林等	309
07	“中国焊接资讯网”建设初探	高亮	朱旗等	312
08	谈谈焊接企业互联网站的建设	唐晓	朱旗等	317
09	中国焊接资讯网(www.weldinfo.net)的建设	谭志成	朱旗等	322
10	“中国焊接信息网(CHINA-WELNET)”的现状与发展方向	王麟书	李爱民	332
11	长输管道药芯焊丝半自动焊接技术	田立	袁崇福	336
12	长输管道药芯焊丝半自动焊接工艺试验研究	田悦	田立	339
13	人工智能控制在机器人焊接中的应用	曾安	李迪	344

计算机视觉在焊接中的应用

清华大学机械工程系 陈强 孙振国

摘要 随着视觉传感、图像处理和人工智能等技术的发展,计算机视觉以其信息量大、精度高、通用性好、检测范围大等特点,在焊接领域得到了广泛应用。本文简要介绍了应用于焊接领域的计算机视觉技术发展现状,综述该技术在焊接中的典型应用,并在此基础上指出了当前存在的问题及未来的趋势和方向。

关键词: 计算机视觉、图像处理、焊接

0 引言

随着冶金、机械、电力、原子能和航天、航空、激光等现代化技术的高速发展,作为材料加工的重要手段之一的焊接技术正向着自动化、智能化方向发展。如何提高焊接生产过程的自动化水平,保证焊接结构的质量成为国内外焊接工作者面临的重要课题。焊接工艺的宏观质量控制通常是根据专家系统,严格遵循工艺评定及标准来保证。而施工生产中的过程质量控制则要求对每个瞬时的焊接条件和规范参数进行监控,其中包括接缝装配情况、位置偏差、焊缝成形、熔透程度以及各种焊接缺陷的信息反馈。为此,各种焊接过程参数检测技术的研究是实现上述控制的前提。

由于焊接过程是一个电、光、热、力等综合作用下的复杂的物理化学过程,为实现焊接生产的机械化和自动化,科技人员不断地致力于开发机械、机电、电磁、电容、超声、红外、光电、激光、视觉、电弧、光谱等多种形式的弧焊传感器。事实上,人类感知外界环境,80%以上是通过视觉得到的。同样,熟练的焊工主要通过其视觉来从事焊接操作与控制。随着计算机视觉技术的发展,借助于CCD摄像机、红外摄像仪、X光探伤仪、高速摄像机等图像传感设备及智能化的图像处理方法,许多机器人及特定的自动焊机也具备了一定的视觉功能。它们不仅可以模拟熟练焊工的视觉感知能力,而且可以超越人类局限,完成诸如:获取并处理强弧光及飞溅干扰下的焊缝图像、实时提取焊接熔池特征参数、预测焊缝的组织、结构及性能等工作,实现在人类难以直接作业的特殊场合(如水下、空间、核辐射环境等)的自动焊接施工,确保焊缝质量的稳定性和可靠性。

本文介绍焊接领域计算机视觉技术发展现状,综述该技术在焊接中的典型应用实例,并在此基础上指出了当前存在的问题及未来的趋势和方向。

1 技术发展现状

焊接中的视觉传感按其检测组件特征的不同大致可以分为两类:一类是以单个或几个光电接收单元(包括线阵列)为检测组件的单光点式一维视觉传感,另一类是机械扫描或电扫描的平面阵列成像式二维视觉传感。三维视觉传感通常是对多个低维传感器获得的信息,进行综合处理运算来实现的^[1,2]。典型的一维、二维以及三维视觉传感的基本原理如下所述。

1.1 一维视觉传感

单光点式一维视觉传感一般是基于单点镜面反射成像原理的(如图1所示),光源聚焦为光点照射(或直接照射)到工件上,其反射光经过一定的光学系统传输到光电接收单元上。工件表面或焊缝坡口的高度信息与反射点位置存在对应关系^[3]。

常用的照射光源有卤钨灯、红外发光二极管、激光管等。卤钨灯具有发光效率高、体积小、功率大、寿命长等优点，激光管具有单色性、方向性和相干性好，辐射密度高等优点，而红外发光二极管具有耗电少、点燃频率高、使用寿命长和体积小等优点^[1,2]。

反射光的接收单元有光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电池、PSD (Position Sensing Device) 等，其中以光电管和 PSD 最为典型^[1,2]。光电管的光电流在一定范围内与入射光通量成正比，由多个光电管组成的光电接收屏（包括线阵列）可以用来检测工件反射光位置的变化，但因为其本质上是离散点检测，所以其灵敏度和动态范围有限。PSD 是近些年发展起来的一种新型的光学接收器件，其基本工作原理如图 2 所示。当光点照射到光敏面上时，将有光电流产生，从两端电极输出的电流 I_1 、 I_2 与反射光点在光敏面上的位置 X_A 的关系为： $X_A = L(I_2 - I_1) / (I_2 + I_1)$ 。PSD 输出的电流信号经过一定的运算处理后即可得到只与接收光点位置有关而与光强无关的信号。由于其检测出的光点位置信号是连续变化的，因此与光电管相比，PSD 灵敏器件具有分辨率高，电路简单，动态响应快的优点^[4,5]。

将一维视觉传感器获得的光电流等传感信息转换为有效的反馈控制信号的过程，早期采用数学运算芯片及专门的硬件电路来实现。随着运算关系的复杂程度和控制要求的提高，现在更多地采用 A/D 器件将信号转换成数值量，送入计算机进行相应处理。此类传感器可以用于焊缝坡口的横向跟踪和焊炬的高度跟踪。

1.2 二维视觉传感

焊接中采用的二维视觉传感器有：象限光电管、摄像管、热像仪、面阵 PSD、面阵 CCD (Charge Coupled Device) 等^[1,2]。图 3 给出了四象限光电管及其等效电路图^[2]。它将光电池或光电二极管的光敏面对称分割为四个部分，处在对称位置的两对光电器件 P_1 、 P_3 和 P_2 、 P_4 组成两对差动式光电接收器，可以用于偏差检测和位置跟踪^[6]。

CCD 是 70 年代发明的光电效应固体成像器件，因其具有灵敏度、噪音低、寿命长、检测精度高等优点，在数字存储、模拟信号处理及作为图像传感器方面得到广泛应用。用于工业图像信息传感的 CCD 像传感器通常分为线阵 CCD 和面阵 CCD 两种，它们既可以用于可见光的传感，也可以用于 X 光、紫外线、红外线成像。CCD 的基本工作原理如图 4 所示，光子不断撞击感光单元阵列，产生相应的电荷并被收集起来，一定时间的间隔之后，将电荷从感光区转移到光隔离存储区，然后再一行一行地转移到一个或多个输出寄存器，随后把这些电荷转换成电压转移到输出电极上。由于 CCD 的图像信息的形成、转移、存贮以及信号输出的过程，依靠合理的时序脉冲驱动电路来顺利完成，可以进行高速扫描，因而可以用于图像信息的高速采集。目前国产线阵 CCD 器件已有 128、

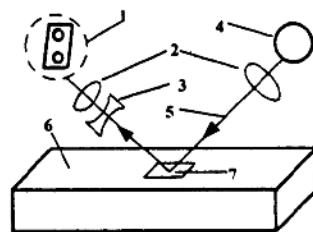


图 1 单点镜面反射原理^[1]

Fig.1 Schematic diagram of single point mirror reflection theory

1 Light receiver, 2 Convex mirror, 3 Concave mirror, 4 Light source, 5 Light, 6 Workpiece, 7 Light spot

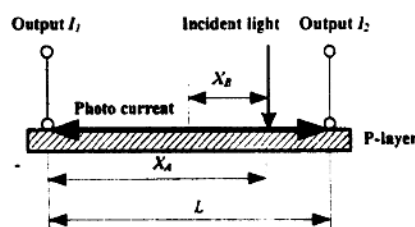


图 2 PSD 工作原理^[3,4]

Fig.2 Principle of PSD

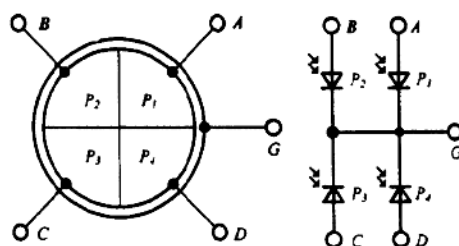


图 3 四象限光电管及其等效电路图^[2]

Fig.3 Four quadrant photocell and its equivalent circuit

256、512 和 1024 像素点等,面阵 CCD 有 100×100 、 120×150 和 320×256 像素点等,速度为每秒钟几十帧。国外线阵 CCD 已做到 4096 像素点以上。面阵 CCD 已达到 4096×4096 像素点以上,而图像摄取速度则可达每秒钟上千帧,最快的达到每秒钟 1 万帧 (64×64 像素点) [2,7]。

视觉图像传感设备获得二维图像后,一般以时间域的模拟信号形式输出。通常还需经由图像采集卡上的 A/D 电路,在同步时钟的作用下转换为离散的空间域数据才能送入计算机处理。计算机内的图像按平面坐标方式分为 $I \times J$ 个(如 256×256 、 512×512 或 1600×1200 等分辨率)像素,每个像素又具有灰度 $G(i, j)$,根据数据采集卡上 A/D 的位数不同,像素灰度被分为相应的等级,如 8 位的 A/D 对应为 256 级灰度 [8]。

常见的市售采集卡如表 1 所示,这些图像卡通常都带有专业的软件包和库函数,可供用户编程调用。除了通用的图像采集卡外,用户还可以根据自己的需要设计专用的基于 DSP、单片机或 PLC 的图像采集电路。现在市面上还出现了无需图像采集卡的 USB 接口 CCD 摄像机。

表 1 常见的市售图像采集卡及其主要性能

型号	制造厂商	适用总线	图像存放	使用语言	操作系统	市价/元
VC32	中国大恒	EISA/AT	卡上 RAM	C, MASM	DOS	8000
VIDEO-PCI-DM	中国大恒	PCI	卡上 RAM	C	DOS/ WIN NT/98	6800
Image-150	美国 Image	VME/AT	卡上 RAM	C, MASM	DOS	20000
Meteor-2/4	加拿大 Matrox	PCI/AT	计算机内存	C++	DOS/ WIN NT/98	6500
PIXCI D32	美国	32 位 PCI	计算机内存	C++	DOS/ WIN NT/98	25000

1.3 二维焊接视觉图像处理方法

焊接中二维图像处理的目的是识别平面上的焊缝位置、焊接缺陷几何尺寸与位置、熔池几何形状等重要特征,一般的处理过程大致分为:平滑滤波与反差增强、边缘检测与图像分割、特征分析与形状描述三个阶段 [8,9]。

(1) 平滑滤波与反差增强

由于弧光、飞溅等随机干扰因素的存在,焊接图像中往往伴有很强的噪声。这不仅影响图像的信噪比,而且会增加正确提取图像特征的难度。为此必须采用合理的算法来去除噪声,同时使图像的边缘得到保护和加强。常用的图像滤波与反差增强方法有:灰度变换法、直方图变换法、邻域平均法、中值滤波法、离散空间差分法、空间域高(低)通滤波法等。

(2) 边缘检测与图像分割

在大多数工业应用场合,二维特征主要由边缘和区域来体现。边缘通常是图像中的某些直线或曲线,边缘附近图像的亮度或亮度梯度有较为陡峭或不连续的变化。区域是指图像中具有相对均匀特性的部分,这种特性可以是色彩、纹理或者亮度等等。焊接图像的边缘往往就是需要检测焊缝、缺陷或熔池的边缘,而区域往往代表了熔池、缺陷、坡口截面、接头形式等。

代表性的边缘检测方法有:空间导数法(如 Roberts、Prewitt、Sobel 等一阶正交梯度操作数,Robinson 和 Kirsch 等一阶方向梯度操作数, Laplacian、LOG 等二阶微分操作数)、模板匹配法、小平面模型法。边缘提取的算法有边缘模型参考法(如 Hueckel 算法)、Hough 变换(用于直线)、广义 Hough 变换(用于曲线)和松弛法等。代表性的区域(图像)分割的方法有边缘检测法、灰度直方图域值法、灰度判别准则法、区域生长法等。

(3) 特征分析与形状描述

在识别出焊缝、熔池或缺陷之后,还需要进行进一步的特征分析和形状描述。如熔池的面积、

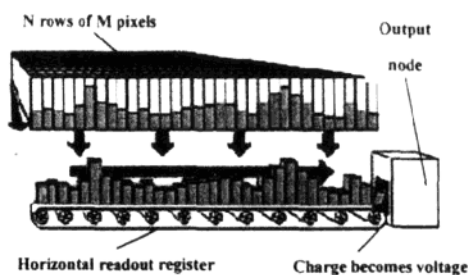


图 4 CCD 基本工作原理 [7,8]

Fig.4 Working principle of CCD

宽度、长度等信息的提取,缺陷面积的计算与类型的识别,接头形式的识别等等。有时还需要将特征分析和形状描述的结果转换为相应的控制变量,为焊缝成形的闭环控制或焊缝实时跟踪等提供条件。

1.4 三维视觉传感

当焊接控制要求和精度提高到一定程度时,就需要用到工件、焊缝、熔池等目标的空间坐标、位置状态等三维信息。

自二维图像中恢复和重建三维信息的方法有:双目立体视觉法、基于光流场的运动分析法、基于二维特征的运动分析法、三维特征匹配法、由图像灰度恢复三维物体形状法和激光扫描式结构光视觉法等^[10]。

双目视觉法是模拟人的视觉功能,用双摄像机从不同角度同时获取目标景物的两幅数字图像,通过一定的计算方法,重建周围景物的三维形状和位置,可用于焊接机器人路径规划、焊缝跟踪和焊炬姿态优化控制等^[11,12]。

二维图像上各点的灰度值反映了三维物体相应点上的反射光强度,而反射光的与物体表面性质和物体表面的几何形状有直接的联系。基于这一原理可以从图像灰度恢复三维物体形状,目前常用的有光度立体视觉(photometric stereo)方法和由单幅图像恢复物体形状(shape from shading)的阴影法等,其中阴影法已经应用于 TIG 焊熔池三维形貌的重建^[13]。

经典的结构光三维视觉方法是将基准光栅条纹结构光投影到物体表面,条纹随着物体表面形状的变化而发生畸变,摄像机摄取物体表面图像;然后采用计算机图像技术,从被物体表面形状所调制的畸变条纹模式中,提取出物体的三维信息。工业应用中,很少采用基准光栅条纹结构光,而是采用简化的激光扫描照射系统(如图 5 所示)^[14-15]。图 6 给出了两种典型焊接接头的结构光传感图像与分析结果^[16]。激光扫描式结构光系统在焊缝跟踪、坡口形状与接头型式检测、多道焊排道等方面已有应用^[14-19]。

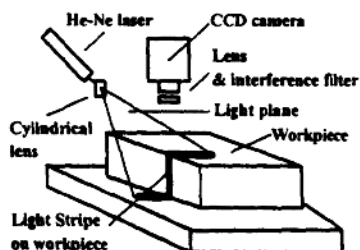


图 5 激光扫描式结构光系统示意图
Fig.5 Principle of laser scanning structure light system

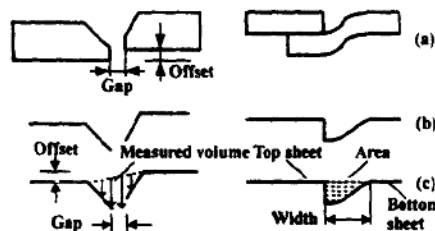


图 6 典型焊接接头的结构光传感图像与分析结果
Fig.6 Typical weld joints, the corresponding sensor images and the analysis results
(a) joint (b) sensor image (c) analyzed image

上述三种三维视觉传感方法中,前两种既可采用主动光视觉,也可采用被动光视觉,而结构光三维视觉属于典型的主动光视觉。主动光视觉必须借助相应的外部照明系统来实现,系统较为复杂。相比之下,随着视觉传感设备和图像处理算法的发展,直接摄取目标的被动光视觉传感方法越来越得到重视。

1.5 发展中的焊接图像处理技术

模糊理论、神经网络、小波变换及分形理论的产生及其在相关图像处理领域的成功应用,为焊接图像处理技术的发展提供了新的有力工具。

模糊理论采用模糊集来定量的表示人类语言和思维中所具有的多样和不确定信息,从而将人的定性思维和判断方法定量化,以适合计算机处理的过程。而模拟人脑智能特点和结构的人工神经网络

络能进行信号处理和模式识别,并具有信息的分布式存储和自学习、联想记忆等功能。二者从不同的角度来模拟人脑智能的特点,都具有并行协同处理和无模型预测的能力^[20]。文献[13][21][22]给出了采用模糊理论和神经网络解决焊接问题的实例。

小波变换是在原来的傅立叶变换(FFT)、Gabor 等谱分析方法基础上发展起来的新算法,与窗口 FFT 相比,小波变换的优势在于其不仅可以同时得到时域和频域的信息,并且能根据需要选择不同的分解尺度来获得最为关注的内容。这种“数学显微镜”的特点能把信号中的信息毫不丢失地分解和重构,因而在信号分离、特征提取等方面得到应用。文献[23]介绍了小波变换在粗晶材料超声探伤中的应用。

分形理论对自然界出现的一些看似不规则的几何形体给出了内在规律的数学描述,将通常的几何空间维数概念从整数扩展到分数的范围。采用分形方法处理焊接图像的核心就是尽可能地利用宏观图像,避免“只见树木,不见森林”的局部不确定性。在焊接图像处理中,可以利用分形的某些特性在较大范围内粗略确定焊缝或熔池的边缘区域,然后在这些区域内采用精细的算法进行局部处理,从而提高边缘检测的精度和速度^[12]。

2 典型应用

随着视觉传感设备和图像处理技术的发展,计算机视觉传感技术在焊接领域的推广应用,为实现焊接操作自动化提供了有力手段。

2.1 一维视觉传感技术的典型应用

文献[24]介绍了 80 年代初研制成功了一种激光-光电管式双向跟踪传感系统。如图 7 所示,He-Ne 激光器发出的光束,通过光导纤维进入传感器,在平行于焊接方向的平面内以一定角度投射于工件上,其反射光被多个光电管组成的点阵式接收屏所接收。横向跟踪原理如图 7(a)所示:当光点打在钢板上时, G_1 接收的信号增强并输出高电平;当光点打在坡口内时, G_1 几乎接收不到信号,因而输出低电平;当光点打在焊缝棱边时, G_1 信号处在设定的上下阈值之间。焊炬高度跟踪原理如图 7(b)所示:高度正常时, G_1 输出高电平, G_2 、 G_3 输出低电平;高度偏高时, G_2 输出高电平, G_1 、 G_3 输出低电;高度偏低时, G_3 输出高电平, G_1 、 G_2 输出低电平。计算机控制系统根据具体输出信号的不同,作出判断和决策,驱动相应机构,实现左右和高低的双向跟踪。由于该系统采用光电管点阵作为接收屏,其输出是二值化的开关量信号,所以在灵敏度、稳定性、跟踪范围和精度上有所局限。

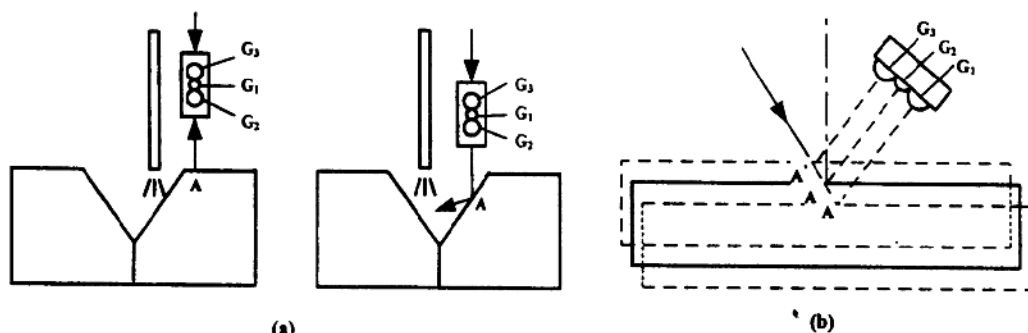


图 7 激光-光电管双向跟踪系统原理图

Fig.7 Principle of Laser-photocell bidirection tracing system

(a) Principle of transverse tracing (b) Principle of height tracing

图 8 给出了一种激光光学扫描式视觉传感系统原理图^[25]。激光束从水平方向照射到扫描轴的镜子上,再反射到工件上。从工件反射的光经过扫描轴的另一镜子方射到透镜,并在线阵 CCD 组件上成像。马达在正反转动下不停地来回转动,而使激光束在工件焊缝处横向扫描。线阵 CCD 成像点的位置与工件高度有着很好的对应关系:工件高度不变时,线阵 CCD 成像点的位置也保持不变;工件高度发生变化时,线阵 CCD 成像点的位置也相应的发生变化。计算机记录不同焊缝截面位置点 x 所对应的线阵 CCD 成像点,就可以获得 x 点的高度信息 y ,从而描述出焊缝坡口的截面形式和具体尺寸。还有一些与上述原理基本相同的变形机构,如文献[4-5]改变了上述的摆镜转动机构,而是将固定在一起的发射源与接收器一起平行于焊缝进行扫描,来获取焊缝坡口特征的。

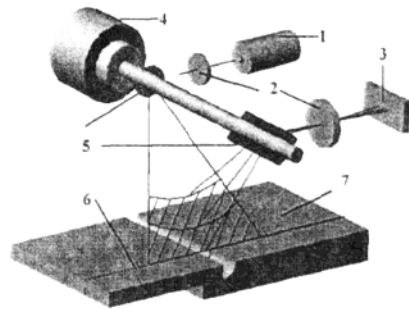


图 8 激光光学扫描式视觉传感系统原理图

Fig.8 Schematic diagram of laser optics scanning vision sensor
1 He-Ne laser, 2 Lens, 3 Linear CCD, 4 Motor, 5 Scanning mirror, 6 Scanning light spot, 7 Workpiece

随着相关技术的发展,低价、轻便的半导体光红外发光管逐步取代了 He-Ne 激光器,而精度更高、检测范围更宽的 PSD、线阵 CCD 逐步取代了早期的光电管阵列。在信号运算处理上,也从最初的简单分立电路处理到中期的集成电路处理,发展为复杂的 CPU 处理电路。

2.2 二维视觉传感技术的典型应用

清华大学开发了通过 CCD 图像同时识别焊缝偏差和弧长的精密全位置 TIG 焊焊接系统,系统结构如图 9 所示。通过选用合适波长的滤光片和合理的摄像机拍摄时刻,可以获得清晰的焊缝图像(如图 10 所示)。图 10 (a) 同时反映了熔池、焊道、电弧及钨极的成像。经过图像处理后,对三者的空间相对位置进行解耦运算,可以分别得到熔池中心(弧斑)与焊缝中心的偏差及弧长信息。

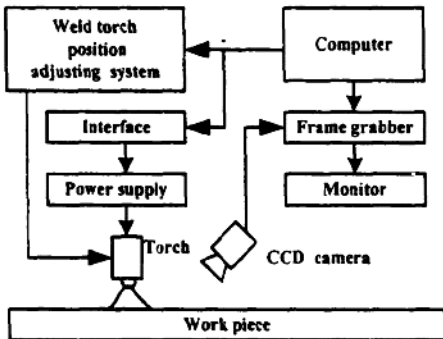


图 9 全位置精密 TIG 焊接系统结构图
Fig.9 Schematic diagram of all position precision TIG welding system

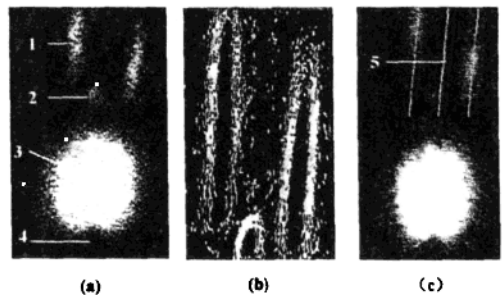


图 10 TIG 焊焊缝图像及其处理

Fig. 10 Seam image and its processing in TIG welding
1 Seam edges, 2 welding pool, 3 Arc, 4 Tungsten, 5 Detected central line of the seam

该系统成功应用于由厚度为 0.33mm 的 3mm×4mm 矩形管螺旋盘绕而成的液体火箭发动机尾喷管缩比件的精密焊接,取得了较好的工艺效果。

CO₂ 焊熔池的视觉检测相对困难一些,必须解决摄像机的固定工作时序与短路发生的随机性之间的矛盾,避开电弧闪烁和飞溅、烟尘的干扰问题。文献[26]认为在熔滴短路阶段弧光及飞溅的干扰较小,是获取熔池图像的最佳时期,为此研制了 CO₂ 焊短路熔池视觉图像传感系统(如图 11 所示),并设计了专门的摄像机开始及结束时刻的同步逻辑控制电路。该电路在接收到短路信号后开始曝光,保证每场只曝光一次,曝光时间为 2ms (图中①),对于短路时间小于 2ms 的非正常短路(图中②)、

短路开始 2ms 内出现跨场（图中④）以及同一场中出现的第二次短路（图中③）等现象自动加以屏蔽。图 12 给出了系统拍摄到的 CO₂ 焊熔池图像，从图中可以清楚地识别出焊丝、熔池、熔渣、焊丝短路点（P）等特征，经过图像处理可以提取出熔池面积、熔池长度、熔池宽度及熔池轮廓曲线等参数，建立了熔池几何参数与焊接规范参数的对应关系，为实现 CO₂ 焊视觉传感与质量控制奠定了基础。

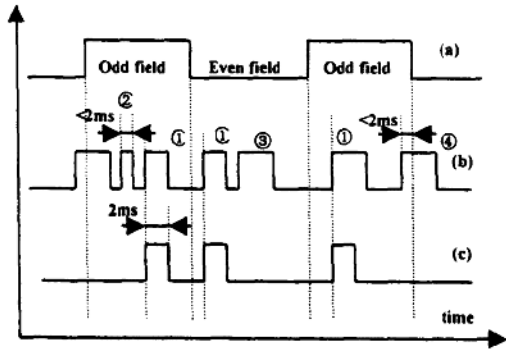


图 11 CO₂ 熔池视觉传感系统同步逻辑
Fig.11 Synchronic logic of CO₂ weld pool sensing system
(a) Shooting schedule of ICCD camera (b) Short-circuiting timing series (c) Synchronic logic

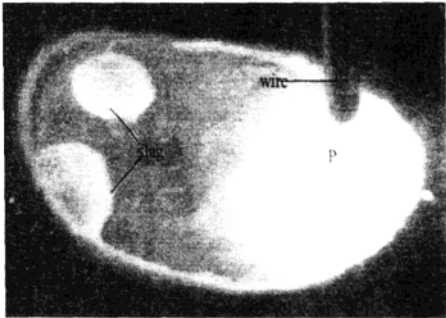


图 12 典型的 CO₂ 焊熔池图像
Fig.12 Typical weld pool image

焊缝区域的温度场内包含着焊接接头质量及性能的重要信息，焊接温度场及其动态过程的检测是焊接领域的前沿课题之一。温度为 T 的辐射源，通过中心波长 λ 、带宽为 $\Delta\lambda$ 的滤光镜，在距离 R 处的 CCD 光敏面上的信号强度为 $Q(T) = m \epsilon C_1 \exp(C_2 \lambda^{-1} T^{-1}) R^{-2}$ 。式中 ϵ 为辐射率； m 为光电转换系数； C_1 、 C_2 是物理参数。对同一温度场，采用两个不同中心波长的滤光片，同时摄取两幅图像，则具体一个物理空间点的图像灰度（对应于辐射）在两幅图像的相同位置上分别为 $Q_1(T)$ 和 $Q_2(T)$ ，

其辐射信号之比值：
$$r = \frac{Q_1(T)}{Q_2(T)} = \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \exp \left[C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1 T} - \frac{1}{\lambda_2 T} \right) \right]$$
，整理后得 $T = \frac{C_2 (\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})}{\ln(r \lambda_1^5 \lambda_2^{-5})}$ ，逐点

求两幅图像的灰度比值，可以获得各点的真实温度。这一测温原理又被称为比色法。基于此原理，文献[27]建立了焊缝背面温度场实时检测系统，图 13 给出一个实际的温度场分布检测结果。从这些温度场分布中可以获得等温线分布、纵向温度分布、横向温度分布、任意点的热循环信息，从而为焊接质量控制提供必要的反馈信息。该文对背面熔点或接近熔点的等温线宽度进行闭环控制，实现了控制熔透的目的。美国 Auburn 大学的 B.A.Chin 以及 Ohio 州立大学的 D.Farson 等在此方面开展了相关研究工作[27-33]。

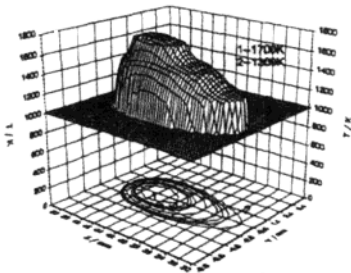


图 13 一个实际的温度场分布检测结果
Fig.13 Diagram of a detected temperature distribution

短路 CO₂ 焊接熔滴形状及尺寸是影响焊接工艺性能和焊缝质量的重要因素。为了分析影响熔滴尺寸的因素和规律，了解熔滴控制效果，文献[34]建立了以 He-Ne 激光器为背光照明的熔滴高速摄像研究系统（如图 14 所示）。高速摄像机以每秒 955 帧的速度，每次连续拍摄 8000 帧熔滴图像。通过对熔滴尺寸与电弧信号相关参数的动态分析，发现短路前熔滴体积及燃弧能量的随机性分布是造成熔滴尺寸不均匀分布的重要原因，而熔滴尺寸与其对应的再燃弧电压有着良好的相关性。在此基础上，确定了将再燃弧能量作为逐个熔滴尺寸控制的反馈量，通过控制燃弧能量，来实现熔滴尺寸

闭环控制的方案,取得了较好的工艺实验结果。

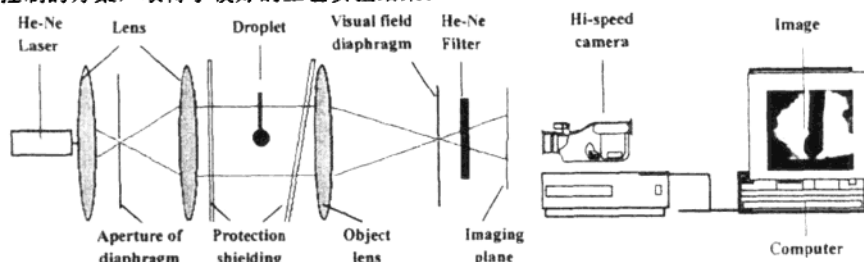


图 14 熔滴高速摄像研究系统

Fig.14 Hi-speed imaging system for the investigation of droplet characteristics

文献[35]介绍了具有 X 射线实时成像、探伤图像获取、缺陷检出、缺陷识别、几何尺寸测量、自动评片、自动生成探伤报告等功能的 X 射线自动探伤及评片系统。不同类型的缺陷各有形状、走向、位置等固有特征,采用图像处理技术可以计算出表征这些特征的缺陷周长、长径、短径及长宽比、面积像素与周长像素比、边界沿水平方向像素数与边界总像素数之比等特征参数,利用这些特征参数可以自动对缺陷进行识别和分类,完成焊缝图像的质量评级。

此外,二维视觉传感技术还在 TIG 焊熔池形状检测和熔透程度控制^[36-46]、GTAW 和 GMAW 焊缝质量评估^[47]、磨擦焊接头性能评估^[48]、激光熔敷质量控制^[49]、MIG 焊焊炬高度和熔池形状检测与控制^[50-51]、窄间隙焊缝自动跟踪^[52]等方面得到了应用,限于篇幅,在此不作详叙。

2.3 三维视觉传感技术的典型应用

目前应用广泛的焊接机器人大多属于示教再现型机器人,操作者通过示教盒在直角坐标系和极坐标系中移动机器人各关节,使焊炬沿焊接轨迹运动,在焊炬路径上记录示教的位置、焊炬姿态、运动参数和工艺参数,并生成一个连续执行全部操作的示教程序。此类机器人存在:不适合在太空、深海、放射性环境等特殊环境下作业,不具备对工作装配误差、焊接过程中的热变形等环境和工作对象变化自适应能力等不足之处。新一代的具有视觉传感功能的,能够自动制订运动轨迹、焊炬姿态和焊炬参数的智能机器人成为未来的发展方向。

文献[11]开发了一套基于双目立体视觉的机器人路径规划系统,该系统将双目摄像机安装在机器人的末端执行器上,使其能跟随焊枪沿焊缝走向一起移动,采用自然光作为视觉系统的光源。经典的计算机三维视觉重构采用两个图像平面上特征点匹配法确定对象的三维坐标,对于焊缝来说,坡口边缘内外不存在明确的特征点,所以无法使用特征点匹配法。针对在局部图像窗口中,焊缝可以近似为直线段的特点,作者设计了一种简化的特征匹配算法来计算焊缝三维坐标,并通过人工神经网络提高了精度和速度。该系统可以实现对直线和曲线焊缝的路径规划。

焊缝空间位置的检测与焊炬姿态的规划是影响机器人全位置自动焊接质量的重要因素。在研制开发成功的焊炬位置和焊炬姿态自动识别调整系统中(如图 15),文献[12]利用分形理论有效地排除



图 15 焊炬姿态规划系统界面

Fig.15 Interface of welding torch pose planning system

了飞溅、锈斑等因素的干扰,结合数学物理模型,较经典的边缘检测算法在速度和精度上都有了很大的提高,实现了对任意焊缝的三维空间描述。同时,借助于大量实验得出不同焊炬姿态对应的焊接规范数据库,使得机器人在任意空间位置焊接时,保持最优的焊炬姿态及焊炬规范参数,保证全位置焊接中焊缝成形的稳定、美观。

大多数视觉传感系统都通过 CCD 摄像机来获得熔池正面图像,然后提取熔池在二维平面上的宽度、长度等几何形状特征参数,在此基础上间接预测焊缝熔深、余高等。事实上,熔池本身是三维的,熔池表面高度信息也反映了焊缝成形好坏和接头质量的高低。文献[13]在脉冲 GTAW 基值期间,利用电弧光作为成像光源,采用两个 CCD 摄像机同时从熔池正面和背面获取熔池图像,获得了清晰稳定的熔池图像,如图 16(a)所示。在此基础上,开发了检测熔池宽度方向和长度方向下塌量的图像处理算法,可以实时提取出熔池的长度、宽度及熔池长度方向和宽度方向的下塌量等三维形状参数。特别是在熔池表面高度提取上,引入由阴影恢复形状的方法,考虑电弧光的光源特性、熔池表面的反射特性、以及摄像机的位置参数等,建立了成像通用反射图模型。对反射图模型进行求解,可以由单幅焊接熔池图像计算出熔池的表面三维形状,如图 16(b)所示。从而为更高层次的焊缝质量控制奠定了基础。

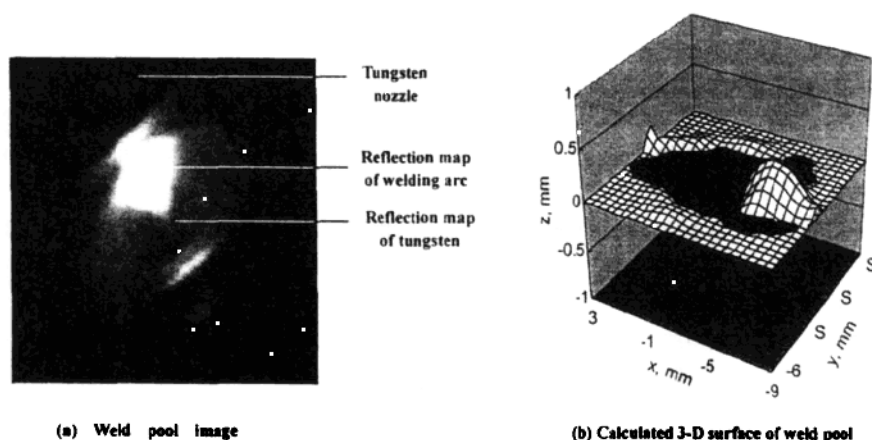


图 16 填丝脉冲 GTAW 熔池图像及表面形状

Fig.16 Weld pool image and its surface shape during Pulsed GTAW with wire filler

3 趋势与展望

焊接技术是先进制造技术的重要构成部分。随着电子技术、计算机技术、自动控制技术以及信息和软件技术迅速地引入焊接领域,焊接生产自动化、智能化已经成为 21 世纪焊接技术发展的重要方向。采用最新的计算机视觉理论,开发焊接机器人视觉传感与控制技术,研制能够识别目标环境、随时精确跟踪轨迹并调整焊接参数的智能焊接机器人已经成为焊接领域的重要发展趋势之一。

为此,国内外许多研究人员对机器人视觉系统在焊接接头特征识别、焊接参数优化、焊炬位姿调节、焊接路径规划、焊缝跟踪、焊缝熔透控制等方面的应用开展了卓有成效的研究^[54-60]。

在此基础上,国外知名的焊接机器人厂家如 KUKA, GMF, Motoman, Adept 等相继开发出装备有新型视觉传感系统的机器人^[53]。与普通机器人相比,新型机器人因其具有更为广阔的应用领域、更为强大的功能及更为优越的性能,而受到市场广泛欢迎,其售价通常是普通机器人的两倍。国内也相继开发出具有视觉传感功能的智能化的特种机器人产品。具有视觉功能的机器人已经应用于汽车、航天和重型构件的生产用于锅炉、管道、大型球罐的焊接生产。

可以预见,在不久的将来,具有视觉功能的智能机器人必将在深水、外层空间及核辐射环境等条件恶劣的工作场合中完全代替焊工,完成焊接操作。

综上所述,计算机视觉在焊缝跟踪、熔池形状与熔透控制、焊道形貌检测与控制、焊接机器人控制等方面得到了广泛的应用,为焊接生产和过程自动化、智能化作出了重要贡献。鉴于焊接过程的复杂性、先进制造业对焊接技术更高层次的需求及用户对新型视觉传感系统更高的性能价格比要求,当前还必须解决以下问题^[8]:

(1) 视觉传感系统的复杂性与可靠性

目前使用的视觉传感系统一般都较为复杂,如结构光三维视觉传感系统有激光发生器、CCD 摄像机、光学转换机构、机械扫描机构等组成,在机构装配和光、机、电协同控制上有较高的要求,同时焊接过程中光、电、磁等干扰因素的存在,大大降低了系统的可靠性。因此需要研制更为简化的、高可靠性的视觉传感系统。

(2) 视觉传感系统的实时性与精确性

焊接质量的视觉传感与闭环控制、机器人焊接的路径规划与姿态控制等都要求计算视觉传感与控制具有很强的实时性和很高的控制精度。常用的光学传感器的信息处理速率不超过 10~20Hz,有时很难满足焊接过程实时性的要求,通常不得不牺牲控制精度。为此必须解决视觉传感系统的实时性与精确性的矛盾。

(3) 视觉传感系统的可控性与智能化

目前对于焊接过程信息的视觉传感与质量控制主要集中于 TIG 焊,但是焊接过程更多地采用的是 MIG、MAG 及 CO₂ 焊接等高效焊接方法。为促进计算机视觉传感技术在这些方法中的应用,必须研究并提高视觉系统的可控性与智能性。

新一代计算机信息处理技术的发展为探索解决上述问题的方案提供了有利条件,集中体现在以下几个方面:

(1) 并行计算机信息处理技术

面对当今信息与知识的高度膨胀,有时候就连最新的工业计算机都无法满足实际要求,因此把数个计算机或 CPU 放在同一个系统内,各自完成一部分信息处理和控制不失为一种有效的解决办法。目前已经有将并行计算机信息处理技术用于焊接机器人控制的实例^[41,60]。

(2) 人工智能信息处理技术

焊接过程的许多物理现象和信号传感无法用准确的数学模型来表达,例如 CO₂ 焊接熔池几何参数与焊接规范参数之间的关系。近年来人工智能技术,特别是专家系统、模糊推理及神经网络的发展为解决此类非线性、强耦合、无确定控制模型的复杂问题提供了有效的工具。国内外已有采用此类技术解决焊缝跟踪、熔池质量控制、焊缝成形控制的成功实例^[39,59]。

(3) 新型图像传感系统与图像处理技术

伴随着微电子技术、计算机技术、集成电路技术的不断发展,性能价格比更为优良的视觉传感器件与系统不断出现。同时 DSP、FFT 等图像处理专用集成电路的出现也必将大幅度提高视觉传感系统的精度、实时性、可靠性。

4 结束语

国内众多研究人员在焊接领域的计算机视觉传感技术方面开展了大量的研究工作,取得了一定的成绩。但与日本、美国及部分欧洲发达国家相比,在实际推广应用水平上还在着较大的差距。广大焊接工作者仍需作出艰苦的努力,为促进我国焊接生产自动化水平的提高作出新的贡献。

参考文献

- 1 王惠民. 光学仪器信号转换技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- 2 顾文郁编译. 现代光电测试技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1993.
- 3 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册焊接方法及设备分册. 北京: 机械工程出版社, 1992.
- 4 米宝. 机械扫描式 PSD 视觉传感及其焊缝跟踪系统的研究. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1996.
- 5 王天亚. 多功能无盲区 Laser-PSD 扫描式焊缝自动跟踪系统的研究. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1999.
- 6 张甲英. 球罐纵缝焊接自动跟踪系统及熔宽实时检测的研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997.
- 7 DALSA Co. Ltd. DALSA DATABOOK (1998—1999), 1999.
- 8 陈丙森主编. 计算机辅助焊接技术. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- 9 李介谷等编著. 图像处理技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1988.
- 10 马颂德等. 计算机视觉—计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998.
- 11 金建敏. 弧焊机器人焊接路径预规划的研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1996.
- 12 路井荣. 弧焊机器人焊炬姿态优化的研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1999.
- 13 赵冬斌. 基于三维视觉传感的填丝脉冲 GTAW 熔池现状动态智能控制. [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- 14 J. E. Agapakis et al. Approaches for recognition and interpretation of workpiece surface features using structured lighting. The International Journal of Robotics Research, 1990, 9 (5): 3~16.
- 15 J. E. Agapakis et al. Vision-aided robotic welding: an approach and a flexible implementation. The International Journal of Robotics Research, 1990, 9 (5): 17~34.
- 16 B. J. Beattie et al. The use of vision sensors in multipass welding applications. Welding Journal, 1988, 67 (11): 28~33.
- 17 岳宏等. 基于结构光焊缝跟踪系统的研究. 河北工业大学学报, 1999, 28 (4): 21~24.
- 18 B. J. Corlett et al. Sensors for narrow-gap welding. IEE PROCEEDINGS-A, 1991, 138 (4): 213~222.
- 19 J. Wu et al. Weld bead placement system for multipass welding. IEE Proc.-Sci.Meas. Technol., 1996, 143(2): 85~90.
- 20 赵振东等著. 模糊理论和神经网络的基础与应用. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- 21 Y. Samed. Fuzzy seam-tracking controller. IEEE 1992, 0-7803-0582-5/92: 966~970.
- 22 S. Yamene et al. Fuzzy control in seam tracking of the welding robots using sensor fusion. IEEE 1994, 0-7803-1993-1/94: 1741~1747.
- 23 Y. J. Chen et al. Use of a wavelet analysis technique for the enhancement of signal-to-noise ratio in ultrasonic NDE. Insight. Nov. 1996.
- 24 潘际奎等. 焊缝棱边双向激光自动跟踪系统的研究. 焊接学报. 1984. No.2.
- 25 S. Bangs. Laser vision robot guides welding arc. Welding Design & Fabrication. 1984, No.11.
- 26 孔文德. 短路过渡焊接熔池形状检测的研究. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1998.
- 27 张华. 焊接温度场实时检测及其应用. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997.
- 28 D. Farson et al. Infrared measurement of base metal temperature in gas tungsten arc welding. Welding Journal, 1998, 77 (9): 396s~401s.
- 29 B. A. Chin et al. Infrared thermography for sensing the arc welding process. Welding Journal, 1983, 62(9): 227s~234s.
- 30 S. Nagarjan et al. Infrared sensing for adaptive arc welding. Welding Journal, 1989, 68 (11): 464s~466s.
- 31 W. Chen et al. Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques. Welding Journal, 1990, 79 (4): 181s~185s.
- 32 P. Banerjee et al. Gradient technique for on-line weld bead width control. Welding in the world, 1993, 31 (6): 17~24.
- 33 P. Banerjee et al. Infrared sensing for on-line weld geometry monitoring and control. Journal of Engineering for Industry, 1995, 117 (8): 322~329.

- 34 吴文楷. 短路过渡 CO_2 焊接熔滴控制. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2000.
- 35 孙忠诚等. 焊缝 X 射线实时探伤数字图像处理方法的研究. 第七届全国焊接学生会议论文集 (3). 1993, 3: 126-130.
- 36 高进强等. 熔池图象传感与几何参数检测. 焊接技术, 1999, (4): 3~4.
- 37 D. Brzakovic et al. Weld pool edge detection for automated control of welding. IEEE 1991, 1042-296X/91: 397~403.
- 38 D. A. Stone et al. Sensor for automated front face weldbead area control. Meas.Sci.Technol., 1991, (3): 263~269.
- 39 S. B. Chen et al. Intelligent methodology for sensing, modeling and control of pulsed GTAW. Welding Journal, 2000, 79 (6): 151s~174s.
- 40 R. A. White et al. Vision-based gauge for online weld profile metrology. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., 1994, 141 (6): 521~526.
- 41 J. S. Smith et al. Transputer-based real time vision system for industrial control. Electrotechnology, 1991, (2/3): 32~36.
- 42 Y. M. Zhang, R. Kovacevic. Dynamic analysis and identification of gas tungsten arc welding process for weld penetration control, Journal of Engineering for Industry, 1996, 118 (2) 123~136.
- 43 Y. M. Zhang, R. Kovacevic. Neurofuzzy model-based predictive control of weld fusion zone geometry. IEEE transactions on fuzzy systems, 1998, 6 (3): 389~401.
- 44 R. Kovacevic, Y. M. Zhang. Neurofuzzy model-based predictive weld fusion state estimation. IEEE 1997, 0272-1708/97: 30~41.
- 45 P.C.J. Anderson. Sensor systems for top-face penetration control. Industrial Robot, 1995, 22 (4): 12~15.
- 46 Baharin et al. Adaptive control of seam tracking through progressive HAZ and weld pool penetration using thickness measurement. IEEE 1995, 0-7803-2559-1/95: 4167~4172.
- 47 G. E. Cook et al. Automated visual inspection and interpretation system for weld quality evaluation. IEEE 1995, 0-7803-3008-0/95: 1809~1816.
- 48 K.Ogawa et al. Evaluation of friction welded joint performance by recognition of burr shape. IEEE 1995 PR00001-3/95: 1163~1166
- 49 E. Renier et al. CCD technology applied to industrial welding applications. IEEE 1996, 0-7803-09-5/96: 1335~1338.
- 50 K. Ohshima et al. Adaptive control of pulsed MIG welding using image processing system. IEEE 1988, 88ch2565-0/88: 1381~1386.
- 51 K. Ohshima et al. Digital control of torch position and weld pool in MIG welding using image processing device. IEEE 1992, 0093-9994/92: 607~612.
- 52 陈小奇等. 视觉系统在窄间隙焊缝自动跟踪中的应用, 机械工程学报, 1993, 29(3): 8~12.
- 53 W. Kolbol. Affordable optical seam tracking. Industrial Robot, 1995, 22 (6): 19~22.
- 54 刘丹军等. 视觉机器人 MAG 焊接参数的在线规划系统, 焊接学报, 1997, 18(1): 50~54.
- 55 肖强. 焊接机器人视觉系统, 焊接, 1999(4): 7~10
- 56 P. Kim et al. Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser sensor. Optics & Laser Technology, 1999, 31: 173~182.
- 57 W. F. Clocksin et al. An implementation of model-based visual feedback for robot arc welding of thin sheet steel. The International Journal of Robotics Research, 1985, 4 (1): 13~25.
- 58 J.S. Kim et al. A robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding. IEEE 1995, 0-7803-2722-5/95: 363~368.
- 59 S. Yamene et al. Fuzzy control in seam tracking of the welding robots using sensor fusion. IEEE 1994, 0-7803-1993-1/94: 1741~1747.
- 60 K. Fuchs. A transputer based vision system for industrial robots. IEEE 1992, 1066-6192/92: 369~374.

焊接变形和残余应力预测理论与计算 ——发展及应用前景

上海交通大学 汪建华

摘要 焊接变形和残余应力的预测和控制至今仍然是工业生产中需要解决的重要课题。本文介绍了国内外焊接变形和残余应力预测理论的最新发展及其应用前景,以及作者近年来在该领域的若干研究成果和应用实例。

关键词: 焊接变形、残余应力、预测理论、有限元

0 前言

伴随焊接过程而发生的焊接变形和残余应力是影响焊接产品精度和性能的重要因素,至今仍然是工业生产中迫切需要解决的重要课题。焊接变形和应力是同时发生和存在于焊接工件之中的,相互联系难以分割。许多研究方法都是把两者放在一起共同进行分析。但焊接变形和残余应力还是有它们不同的侧重点。对于一些塑性良好的低碳钢材制造的焊接构件,往往控制焊接变形保证制造精度是主要的。而对一些高强度钢制造的重要结构,往往如何降低残余应力、防止焊接裂纹的产生和接头强度的下降成为主要的考虑点。因此也有一些研究方法主要适合于焊接变形的预测,而难以对残余应力进行仔细的分析。

由于焊接过程和焊接构件的复杂性,在实际生产中对焊接变形和残余应力的变化规律往往还是认识不足和难以掌握。至今在许多情况下仍然还是凭经验,因此往往难以达到产品的精度和性能的要求,例如发生尺寸超差、导致焊接裂纹或者在使用过程中出现应力腐蚀裂纹等等。为此经常需要对焊接产品进行矫正或修补,焊后消除应力处理,甚至因处理不当而造成产品的报废等情况。多年来国内外学者和专家对焊接变形和残余应力进行了大量的研究。特别是近年来随着数值方法和计算机技术的发展,许多原来难以解决的问题,有了实现的可能,也取得了不少研究成果。然而离开在实际焊接生产中的广泛应用还有相当大的差距。本文的目的就是介绍国内外焊接变形和残余应力预测理论的最新发展及其应用前景,以及作者近年来在该领域的若干研究成果和成功的应用实例。希望该领域的研究成果能在实际生产应用中发挥更大的作用。

1 焊接变形与应力的预测理论的及其发展

1.1 建立在实验和统计基础上的经验曲线与公式

目前在一些焊接手册^[1]上有一些焊接变形的经验公式和数据。例如焊缝纵向收缩量,焊缝横向收缩量,平板堆焊以及T型接头的角变形等。这些经验数据是在一定条件下的实验或生产实际中得到的,而且只是一些最简单的情况。它们存在相当的局限性,实际参考时应给予注意。

1.2 基于一维解析的残余塑变法

早期,预测焊接变形有所谓假想力法。此后就被一维解析的残余塑变法所代替。前苏联的H. O. 奥凯尔布朗姆用图解的形式分析了一维条件下焊接过程中的应力应变过程,对了解焊接应力与变形产生的原理和本质有重要的贡献。可以说至今它仍然是焊接应力与变形在教育领域的理论基础。基于该理论提出了以残余塑变来计算焊接变形的办法。这一方法在C. A. 库兹米诺夫的著作里得到进一步的发展并形成一个较完整的系统^[2]。它较适合梁架型等结构的焊接变形分析。然而由于该方法是建立在平截面假定及其它一系列简化假定的基础上,要解决较复杂一些构件焊接应力与变形的定量分析是十分困难的。

1.3 焊接热弹性有限元分析

随着计算机和有限元等数值方法的发展,七十年代初,日本的上田幸雄等^[3]首先以有限元法为基础,