



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

焊接过程传感与控制

Measurement and Control of Welding Process

● 张广军 李海超 许志武 编著

哈尔滨工业大学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

焊接过程传感与控制

Measurement and Control of Welding Process

● 张广军 李海超 许志武 编著

常州大学图书馆
藏书章

哈尔滨工业大学出版社

TG 4X
61

内容简介

本书是根据焊接专业新教学大纲的“焊接过程传感与控制”课程编写的教材。主要内容包
括:焊接过程中的传感与控制问题概述,典型传感器原理及特性,焊缝跟踪传感,焊缝成
形传感,焊接过程计算机控制系统的组成、工作原理和设计方法,焊接过程控制方法,焊接过
程传感与控制实例分析等。

本书的读者对象为材料加工工程、焊接、自动化等专业的高年级本科生、研究生和教师,
以及相关专业的科研技术人员。

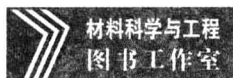
图书在版编目(CIP)数据

焊接过程传感与控制/张广军,李海超,许志武编著. —哈尔滨:哈尔
滨工业大学出版社,2013.6

ISBN 978-7-5603-4061-6

I. ①焊… II. ①张… ②李… ③许… III. ①焊接工艺-高等学校-教材
IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 085578 号



责任编辑 许雅莹

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 511 千字

版 次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4061-6

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

本书是为焊接专业“焊接过程传感与控制”课程编写的教材。

“焊接过程传感与控制”是焊接技术与工程专业本科生的一门必修课,也是一门带有一定共性的专业基础课。作者编写本书的目的是自动焊接中保证焊缝成形质量为中心,通过本书的内容使读者掌握焊接过程各种物理量的常用检测手段、数据采集和信号处理方法,熟悉焊缝跟踪和焊缝成形质量的传感、建模和控制方法,了解焊接过程计算机控制系统的组成、工作原理和设计方法,为进一步学习、研究和处理焊接技术问题打下基础。

本书完全按照焊接技术与工程专业教学大纲的要求组织内容,针对性强,在夯实学科基础知识的前提下,突出领域的最新发展和成果介绍,做到既有理论,又有实例。

本书包括绪论及8章内容。绪论部分是对焊接过程传感与控制的必要性、特点、研究现状等的概述;第1章介绍焊接过程典型物理量的传感方法;第2章阐述数据采集与信号处理的理论与方法;第3章讲解用于焊缝跟踪的几种主要传感方法;第4章围绕焊缝成形传感展开;第5章介绍自动控制原理方面的基础知识;第6章和第7章描述计算机控制系统的组成、输入输出接口、设计方法等;第8章通过剖析焊接参数实时采集与分析系统、结构光视觉跟踪系统、反面熔宽检测与控制系统3个典型例子的设计过程,重点介绍焊接过程传感与控制系统设计的思路、要点和方法。

本书的绪论、第5章、第8章由张广军编写,第1~4章由李海超编写,第6章和第7章由许志武编写。张广军统稿全书。

本书的编写参考了大量的相关资料,在参考文献中列出,如有遗漏,敬请谅解。

由于编者水平有限,不当之处欢迎专家和读者指正。

编 者

2013年5月于哈尔滨

目 录

绪 论	1
0.1 焊接过程传感与控制的必要性	1
0.2 焊接过程传感与控制实例	2
0.3 焊接过程传感与控制的特点	9
0.4 焊接过程的智能控制	11
0.5 本课程的任务	14
思考题及习题	15
参考文献	15
第1章 焊接过程典型物理量的传感方法	16
1.1 引 言	16
1.2 焊接过程的典型物理量	16
1.3 传感器基本知识	18
1.3.1 传感器的概念	18
1.3.2 传感器的构成	18
1.3.3 传感器的分类	18
1.3.4 传感器的特性	19
1.4 位移传感器	23
1.4.1 电感式传感器	23
1.4.2 电容式传感器	24
1.4.3 电位器式传感器	25
1.4.4 应变片式传感器	27
1.4.5 光栅式传感器	27
1.4.6 超声波传感器	29
1.5 温度传感器	31
1.5.1 热电阻式温度传感器	32
1.5.2 热电偶式温度传感器	33
1.5.3 光纤温度传感器	37
1.5.4 红外温度传感器	39
1.6 视觉传感器	41
1.6.1 光电管	42
1.6.2 光敏半导体器件	43
1.6.3 光电位置传感器	43
1.6.4 电荷耦合器件	44
1.7 霍尔传感器	48

1.7.1 霍尔效应的基本原理	48
1.7.2 霍尔效应的主要特征	49
思考题及习题	49
参考文献	50
第2章 焊接过程的数据采集与信号处理	52
2.1 引 言	52
2.2 基本概念	52
2.2.1 数据采集	52
2.2.2 信 号	53
2.2.3 数据处理	53
2.3 数据采集	54
2.3.1 数据采集原理	54
2.3.2 数据采集系统	58
2.4 采集信号的预处理	61
2.4.1 数字滤波	61
2.4.2 信号补偿	62
2.4.3 平滑处理	64
2.5 信号分析与处理基础	65
2.5.1 信号分析	65
2.5.2 数字信号处理基础	67
2.6 数据采集与处理常用工具软件	68
2.6.1 LabVIEW 简介	68
2.6.2 MATLAB 简介	69
思考题及习题	69
参考文献	69
第3章 焊缝跟踪传感	71
3.1 概 述	71
3.1.1 焊缝跟踪与智能化焊接	71
3.1.2 焊缝跟踪对传感器的要求	71
3.1.3 焊缝跟踪传感器的分类	72
3.2 电弧跟踪传感	72
3.2.1 基本原理	72
3.2.2 摆动扫描式电弧传感	74
3.2.3 旋转电弧传感	74
3.2.4 磁控电弧传感	76
3.2.5 并列双丝电弧传感	76
3.2.6 GTAW 弧长传感	77
3.2.7 电弧跟踪传感器的应用	78
3.3 视觉传感焊缝跟踪	78

3.3.1 焊接中的视觉传感分类	79
3.3.2 主动视觉传感	81
3.3.3 被动视觉传感	90
3.4 接触式传感焊缝跟踪	93
3.5 红外辐射传感焊缝跟踪	95
3.6 电磁传感焊缝跟踪	96
3.7 超声传感焊缝跟踪器	98
思考题及习题	99
参考文献	100
第4章 焊缝成形传感	102
4.1 概 述	102
4.1.1 熔池及其尺寸参量	102
4.1.2 焊缝成形参数	103
4.1.3 焊缝成形传感方法	105
4.2 视觉传感检测焊缝成形	106
4.2.1 被动视觉成形传感	106
4.2.2 主动视觉焊缝成形传感	120
4.3 熔池振荡法熔透传感	123
4.3.1 熔池震荡的基本规律	123
4.3.2 熔池振荡信息的检测	125
4.3.3 基于熔池振荡的熔透控制	125
4.3.4 应 用	126
4.4 熔池红外热像法的熔透控制	127
4.4.1 概 述	127
4.4.2 应 用	128
思考题及习题	130
参考文献	131
第5章 焊接过程自动控制方法	134
5.1 概 述	134
5.1.1 自动控制的基本概念	134
5.1.2 自动控制的基本术语	135
5.1.3 控制系统的动态性能指标	136
5.1.4 控制系统的分类	137
5.1.5 对控制系统的基本要求	139
5.1.6 控制理论的发展过程	140
5.1.7 控制理论在焊接过程中的应用	145
5.2 PID 控制	150
5.2.1 PID 控制的原理	150
5.2.2 数字 PID 控制算法	153

5.2.3 PID 控制器参数的整定	155
5.2.4 PID 控制器在焊接中的应用	158
5.2.5 智能 PID 控制器	161
5.3 模糊控制	164
5.3.1 模糊的概念	164
5.3.2 模糊控制的基本思想	165
5.3.3 一般模糊控制系统结构及设计过程	170
5.3.4 模糊控制在焊接中的应用	174
思考题及习题	178
参考文献	179
第 6 章 焊接过程计算机控制系统的设计及其抗干扰	180
6.1 计算机控制系统概论	180
6.1.1 计算机系统的组成	180
6.1.2 控制用计算机系统的硬件及软件要求	182
6.1.3 计算机控制系统的发展与分类	184
6.1.4 对计算机控制系统的要求	198
6.2 计算机控制系统的设计与实现	199
6.2.1 计算机控制系统总体设计步骤	199
6.2.2 计算机控制系统设计方法	200
6.3 计算机中断技术	201
6.3.1 中断的概念及分类	201
6.3.2 中断的基本过程	202
6.3.3 8086/8088CPU 的中断结构	204
6.3.4 可编程中断控制器 8259A	207
6.4 计算机控制系统的抗干扰及可靠性技术	217
思考题及习题	222
参考文献	222
第 7 章 焊接过程计算机控制系统的接口设计	223
7.1 接口技术的基本知识	223
7.1.1 接口的概念及组成	223
7.1.2 接口的功能	224
7.1.3 接口的分类	225
7.1.4 CPU 与 I/O 设备之间的接口信息	225
7.1.5 I/O 端口的编址方式	226
7.1.6 CPU 与接口的数据传送方式	227
7.2 可编程并行接口芯片 8255A	230
7.2.1 并行接口的概念	230
7.2.2 可编程并行接口芯片 8255A	230
7.2.3 8255A 的应用	239

7.3 串行通信和串行通信接口	240
7.3.1 串行通信	240
7.3.2 串行通信传送方式	240
7.3.3 串行通信原理	240
7.3.4 串行通信速率	242
7.3.5 串行接口标准	243
7.3.6 可编串行通信接口 8251A	246
7.3.7 串行通信和并行通信的比较	253
7.4 定时/计数接口及其应用	254
7.4.1 定时/计数器的基本概念	254
7.4.2 可编程定时/计数器 8253A	254
7.4.3 8253A 的编程及应用	263
7.5 数/模(D/A)转换技术	266
7.5.1 概 述	266
7.5.2 D/A 转换的基本原理	268
7.5.3 D/A 转换器的主要技术参数	270
7.5.4 常用 D/A 转换器及接口	271
7.6 模/数(A/D)转换技术	280
7.6.1 A/D 转换的基本原理	280
7.6.2 A/D 转换器的主要技术参数	284
7.6.3 ADC0809 的结构和功能	285
7.6.4 ADC0809 的应用	288
思考题及习题	289
参考文献	290
第 8 章 焊接过程传感与控制系统设计实例	291
8.1 焊接电流、电压实时采集与分析系统	291
8.1.1 设计要求	291
8.1.2 硬件系统设计	291
8.1.3 软件系统的设计开发	295
8.1.4 测量结果	298
8.2 结构光焊缝跟踪系统设计	299
8.2.1 设计要求	299
8.2.2 系统组成	300
8.2.3 结构光视觉传感器的设计	300
8.2.4 计算机控制接口	303
8.2.5 软件设计	304
8.2.6 集成调试和跟踪效果	311
8.3 反面焊缝熔宽检测与控制系统设计	313
8.3.1 设计要求	313

8.3.2 系统组成	313
8.3.3 硬件系统设计	313
8.3.4 软件系统设计	317
8.3.5 反面熔池图像处理及反面熔宽的提取	318
8.3.6 模糊控制器设计	319
8.3.7 控制实验效果	323
思考题及习题	325
参考文献	326

绪 论

众所周知,焊接生产存在烟尘、飞溅、有害气体、噪声、高温、弧光辐射、电磁辐射等多种污染,将人从有害的、繁重的体力劳动中解放出来一直是焊接工作者追求的目标,焊接自动化就此应运而生。简单的自动化是自动焊接小车等,适应性差,应用范围受限。反过来看焊工可以完成复杂工况的焊接,是靠眼、耳、大脑、手的配合。为了向全自主焊接方向发展,提高焊接自动化系统的鲁棒性和适应性,需要大力开展焊接过程传感与控制研究,给焊接自动化系统加上“眼睛”和“大脑”。

0.1 焊接过程传感与控制的必要性

从广义上说,凡是影响自动化焊接质量的因素都需要检测与控制,如焊接工艺参数、弧长、坡口尺寸,等等。

从狭义上说,焊接过程传感与控制主要指自动化焊接中的焊缝跟踪和焊缝成形控制。

焊接自动化遵循手工焊接→半自动化焊接→自动焊接→自适应焊接→人机协作焊接→自主焊接的发展脉络。

目前,技术成熟、应用最广的是自动焊接方式;自适应焊接还处于应用研究阶段,焊缝跟踪技术有部分应用;人机协作焊接的概念刚刚提出;自主焊接还是理想目标。

以焊接专机(刚性自动化)和示教再现机器人(柔性自动化)为代表的自动焊接是比较低级的控制方式,焊接任务事先确定,一般不用或仅用简单的传感手段,焊缝成形质量依靠的是焊缝坡口加工质量的一致性、焊缝位置的精确定位(由工装保证)、焊接工艺参数的稳定性等,因此,一般自动焊接方式只适合于简单的焊缝,如长直缝、环缝等,并且对焊前工件的准备和定位精度要求较高,适应性差。

在实际焊接中,一方面,存在工件形状误差、装配误差、焊缝坡口形状的变化、工件焊接变形等影响焊缝对中的因素;另一方面,存在变散热、变间隙、变错边等影响焊缝成形的干扰因素。常规的只具有示教再现功能的机器人或只具有恒定参数设置的自动焊接设备,由于无法克服批量生产中所遇到的这些干扰和变化已经难以满足高质量焊接的要求。

反观手工焊接,很复杂的情况,如变厚度、大间隙、大错边等,高级焊工都能焊出合格的焊缝,表现出高度适应能力。那么,焊工是如何操作的呢?

如图0.1所示,焊工的操作过程就是不断地观测→决策→调整,焊工用眼睛观察来感知焊接信息,如接头位置、电弧形状、熔池大小等,大脑综合运用焊接知识与经验对这些信息进行处理,并作出决策,由手来执行对焊枪等的调整,从而获得高质量的焊缝。

模拟焊工的控制过程,一个自动化焊接系统要想具有适应能力,首先需要类似人体感官的焊接传感器,对影响焊接结果的内外条件进行检测;其次,需要类似于焊工对焊接过程的认识,就是建立焊接过程模型,即描述焊接过程状态的知识 and 经验的抽象化;最后还需要

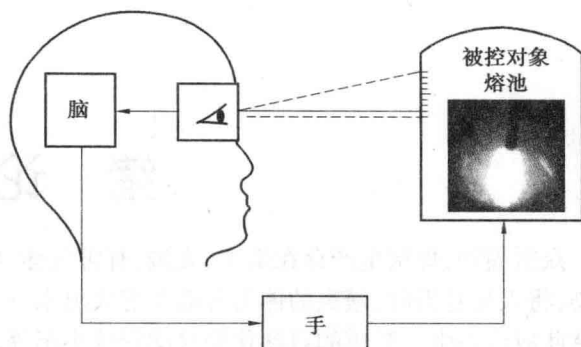


图 0.1 焊工的操作过程

类似于人脑的控制器,根据控制规则作出判断与决策,由执行器来调整控制量的大小。这个过程如图 0.2 所示。

可见,焊接过程传感与控制是自动焊接向自适应焊接、自主焊接发展所必须解决的问题。

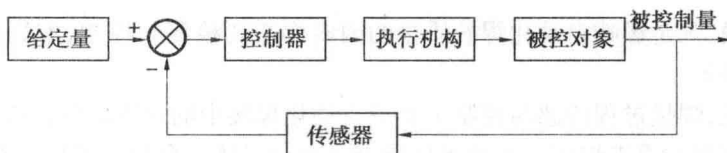


图 0.2 典型焊接过程控制系统框图

0.2 焊接过程传感与控制实例

下面通过几个实例,使读者对焊接过程传感与控制有个感性的认识。

1. 基于结构光视觉传感的焊缝坡口与成形检测

焊缝坡口位置和形貌的检测是实现焊缝跟踪的前提。接头几何形貌的变化本质上是高度的变化,因此需要各种测高的传感器。图 0.3 为基于三角测量原理的结构光视觉传感方法,可以精确地检测出接头截面几何形状和空间位置信息。此种传感方法适用于对接、搭接、角接等各种接头类型的自动跟踪和参数适应控制,还可用于多层焊的焊道自动规划、参数适应控制和焊后的接头外观检查等。图 0.4 为系统使用两个结构光传感器,焊枪前面的传感器检测坡口位置,用于焊缝跟踪;焊枪后面的传感器检测焊缝成形外观,用于焊后成形质量检测和控制等。

2. 焊接熔池视觉图像检测

焊接熔池是最主要的检测目标,也是相对较难的检测对象,主要是要克服弧光的干扰。

视觉图像传感不影响正常焊接过程,能提供丰富的信息,如接头形式、熔池边界、电弧形态、焊丝位置及已凝固的焊道形状等,因此是最有发展前景的传感技术之一。

(1) 主动式视觉图像传感

为了克服弧光的影响,主动式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。目前应用较多的是通过一定的方法产生一条、多条或网状分布的结

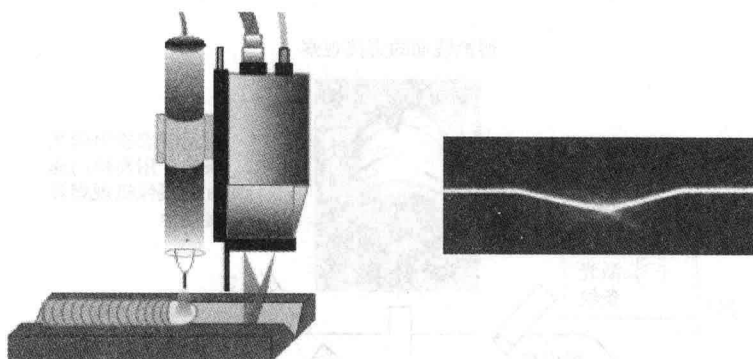


图 0.3 基于结构光视觉传感的焊缝坡口检测

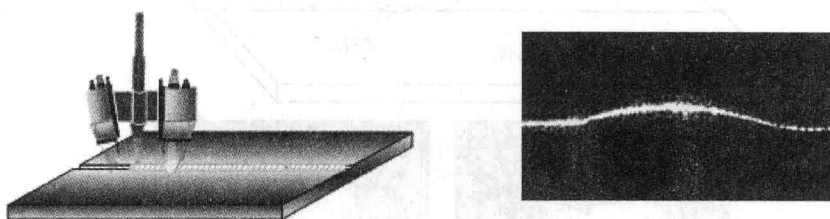


图 0.4 坡口位置和焊缝成形质量同时检测

构光投射到焊件上,根据结构光条纹变形获取熔池几何形状信息。主动式视觉可以获得较清晰的熔池图像。

如图 0.5 所示,一套熔池视觉检测系统由强脉冲激光栅格状多结构光条纹和高快门速度的摄像机组成。脉冲激光器的平均功率为 7 mW,激光脉冲持续时间为 3 ns,激光脉冲功率可达 50 kW,激光波长为 337 nm。在激光脉冲持续时间内,激光的能量密度远远大于弧光的能量密度,在摄像机曝光时间内激光的光强远远大于弧光的光强,从而有效地抑制了弧光干扰,获得了非常清晰的 TIG 焊熔池表面反射图像。

可见,主动式视觉传感获取的图像质量是较为理想的,但是,昂贵的高能量密度脉冲光源和特殊电子快门的摄像机限制了这种方法在实际中的应用。

美国学者张裕明教授提出了一种非常新颖的低成本的主动式视觉熔池形貌检测方法,如图 0.6 所示。小功率(24 mW)结构光条纹激光器投射激光条纹于熔池表面,利用熔池表面和工件表面反射特性上的差异,由成像屏接收熔池表面镜面反射过来的激光条纹,如图 0.7(a)所示;可以用普通摄像机观察记录成像屏上的动态条纹变化,通过对条纹图像的解读,可以获得熔池表面三维形貌,如图 0.7(b)所示。

如此小功率的激光在强电弧光存在下仍能获得清晰的激光反射条纹图像,结果令人印象深刻。该传感系统创造性地利用了激光与电弧光在传播衰减特性上的差异。如图 0.8 所示,电弧光强随着距离的增加而迅速衰减。另一方面,激光的相干性和单向性好,在激光传播过程中,强度损失相对于电弧来说可以忽略不计。这样把成像屏放置于一合理的位置,在此位置,激光的光强超过了弧光光强,在成像屏上获得了清晰的激光反射条纹图像。

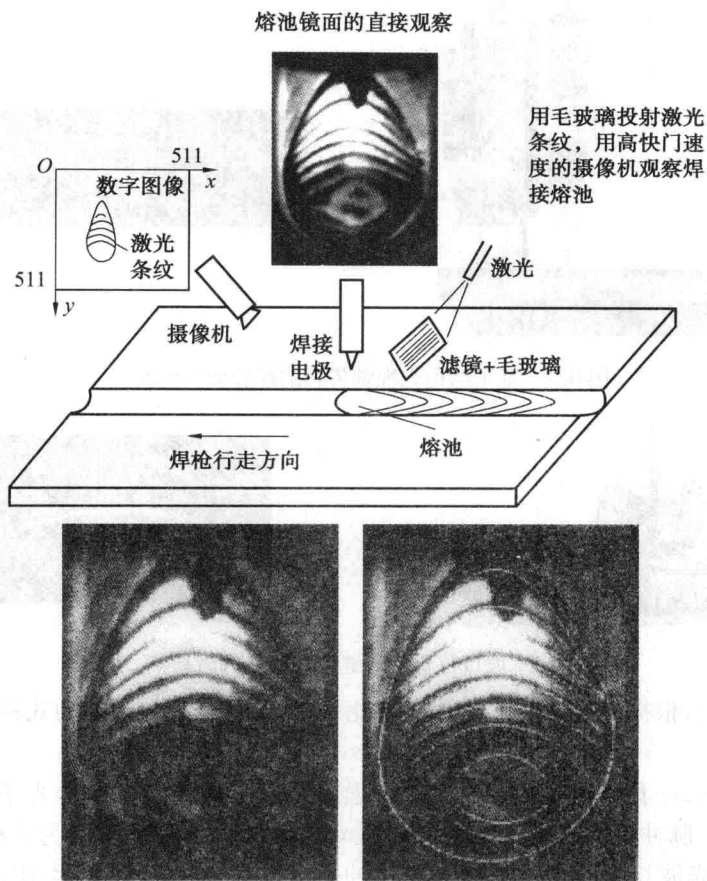


图 0.5 主动式视觉熔池图像检测

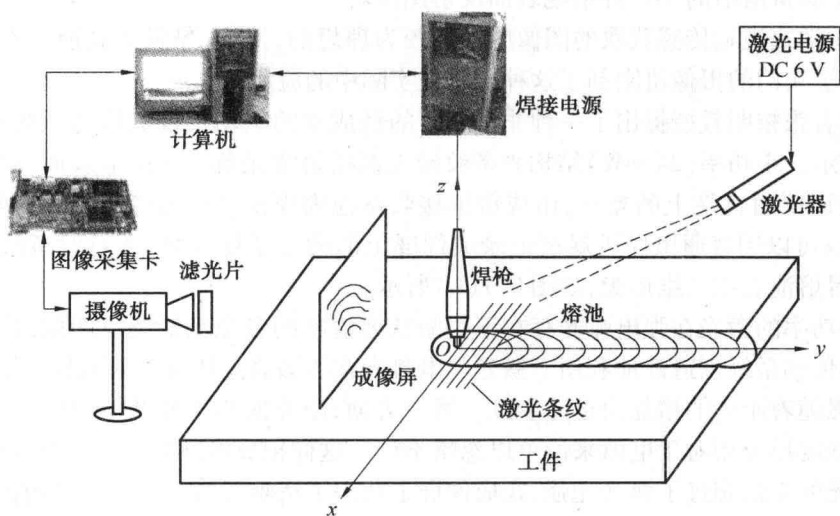


图 0.6 低成本的主动式视觉熔池形貌检测方法

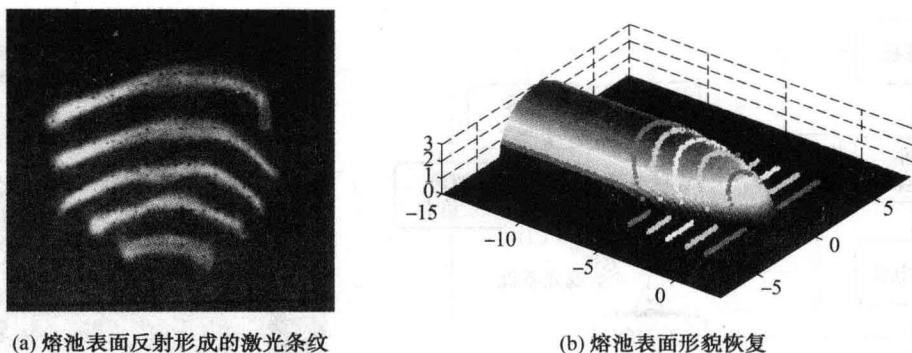


图 0.7 激光条纹及熔池表面形貌恢复

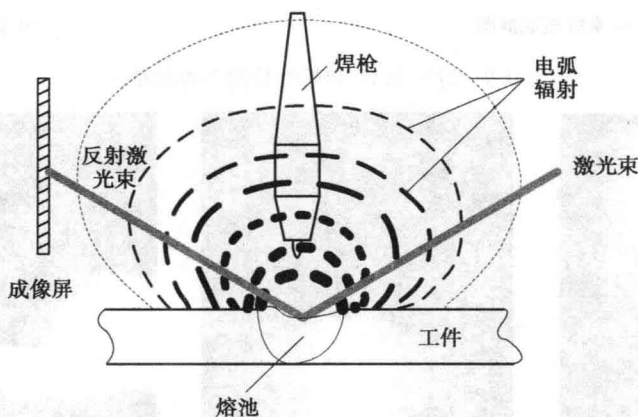


图 0.8 激光与电弧光在传播上的差异

(2) 被动式熔池图像视觉传感

现在,人们更多地研究被动式直接视觉检测方法。被动式直接视觉检测方法不需要另加辅助光源,而是利用液态金属黑体辐射光、金属蒸气发光、电弧光等检测焊接区形貌信息。通过选择一个特定的辐射频域,使焊接区各辐射源的光强达到一个合适的比例,能够实现从单一信号源中得到焊接区图像的综合信息,提高了在可见光波长内电弧、熔池和焊缝三者同时成像的清晰度。

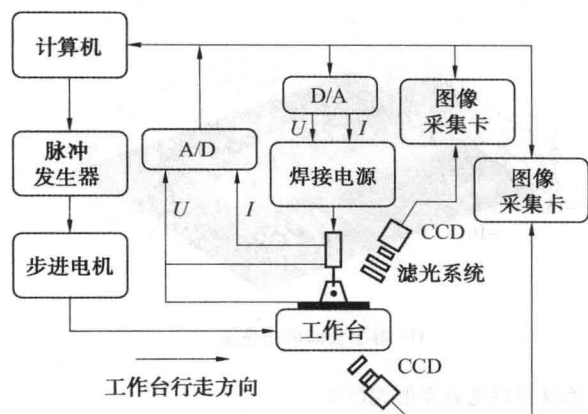
被动式直接视觉检测方法应着重考虑的问题是如何避免电弧光对焊接区成像的干扰,又对其加以利用使焊接区成像的质量更好,有利于焊接区特征信息的提取。

目前,常用的克服弧光干扰的措施为:低的取像电流配合复合滤光技术。

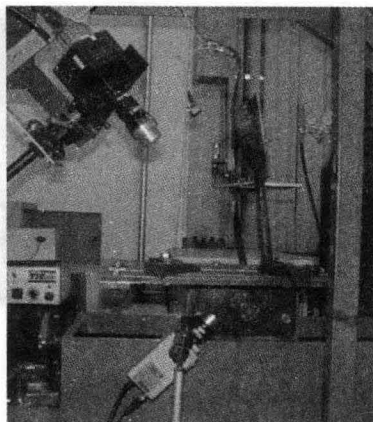
图 0.9 是基于直接视觉传感的脉冲 MAG 焊缝成形检测与控制系统。不同角度观测到的 MAG 焊正面熔池图像如图 0.10 所示。

为了建立 TIG 焊熔池正面特征信息与反面熔宽的关系模型,特殊设计了多方位同时同幅图像传感的光路系统,组成填丝脉冲 GTAW 焊接区图像传感系统,可同时同幅获得熔池正前方、正后方和反面三个角度的图像,如图 0.11 所示。

由熔池图像对比可见,被动式视觉检测的熔池图像的清晰度要比主动式视觉的差一些,但是由于被动式视觉传感系统只使用窄带滤光片和普通 CCD 摄像机,设备少、成本低,因此更适合在焊接生产实际中使用。

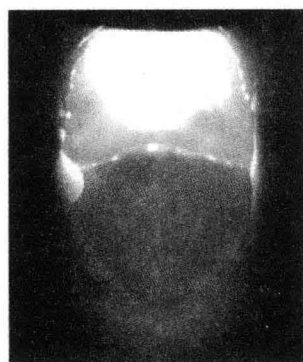


(a) 系统组成框图

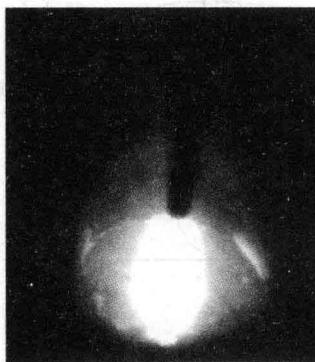


(b) 实物图像

图 0.9 脉冲 MAG 焊熔池检测与控制系统



(a) 正后方观察

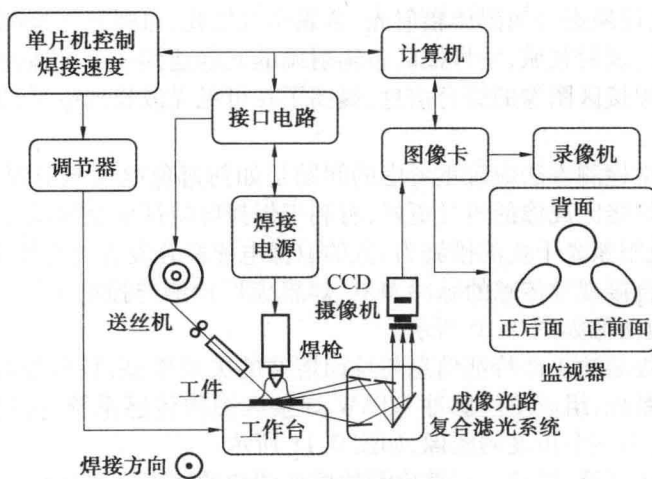


(b) 正前方观察



(c) 侧面观察

图 0.10 不同角度观测到的 MAG 焊正面熔池图像



(a) 系统组成

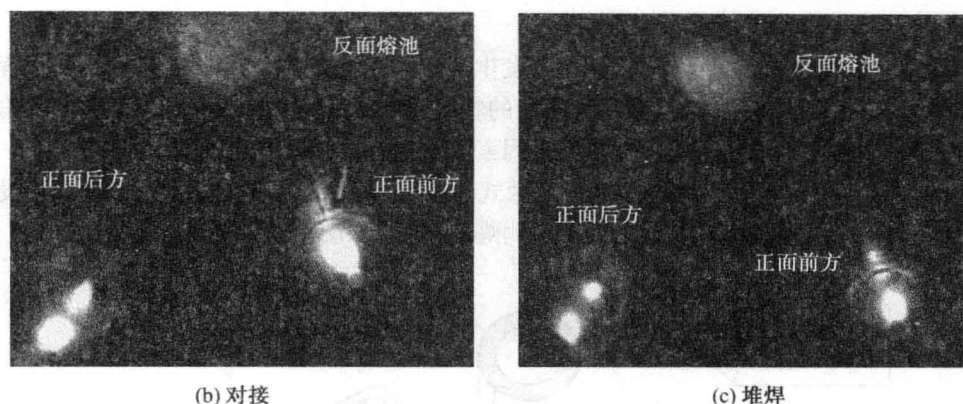


图 0.11 填丝脉冲 GTAW 熔池图像多角度传感

3. 焊接区温度场检测

工件焊接区温度场分布是描述焊接过程的重要特征参数之一。利用红外摄像机摄取焊接区温度场,根据其分布特点可判断电弧对中、电弧不对中、接头间隙发生改变、错边、接头具有杂质等情况。

图 0.12 为利用 SAT-HY6800 红外热像仪测量 TIG 焊工件上的温度场分布。

目前远红外传感器价格还很昂贵,限制了其推广应用。

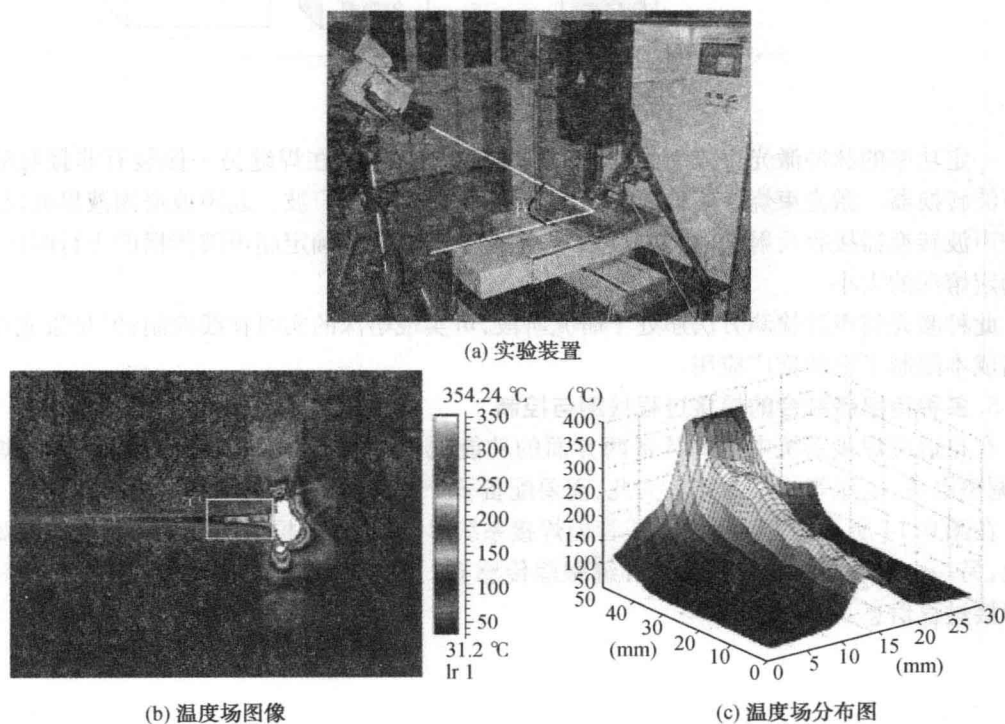


图 0.12 焊接区温度场检测