

上海交通大学

硕士学位论文

基于视觉传感的焊缝自动跟踪系统研究

姓名：盛仲曦

申请学位级别：硕士

专业：材料加工工程

指导教师：林涛

20090101

基于视觉传感的焊缝自动跟踪系统研究

摘要

目前服役的焊接机器人 90%都是以“示教 - 再现”模式进行工作的，少数以轨迹规划方式工作。焊接过程中，焊枪与焊缝中心都会存在一定误差，并且，焊接过程又是一个复杂、非线性、干扰因素较多的过程，焊接工件热变形、咬边、错边，以及焊缝间隙的变化等是不可预知的，这些因素都会直接影响到焊接质量。在“示教 - 再现”或轨迹规划应用的基础上，实时焊缝纠偏可以进一步提高焊接精度，尤其适用于辅助工程上焊接易变形、装配复杂等自动焊难以控制的工件生产。

本文基于总装“十一五”预研项目，以新型航天器燃料贮箱 2mm 铝合金薄板的焊接为背景，针对脉冲 TIG(钨极惰性气体保护焊)焊接方法，对平板直缝和平板法兰进行焊缝跟踪实验，将传统的“示教 - 再现”型机器人开发成具有实时焊缝跟踪的弧焊机器人系统。

本文先构建了焊接机器人系统平台，包括：

1. 设计了合适的滤光 - 减光系统，能够清晰采集到焊接电流基值时的焊接图像，解决了弧光对焊接图像质量影响较大的问题；
2. 利用 PC 机、A/D 卡、D/A 卡、图像卡，在 Visual C++环境下，采用多线程技术，同时进行采集图像、处理图像、计算并发送纠偏电压等功能。

本文研究了 2mm 铝合金薄板无坡口脉冲 TIG 焊接过程中的熔池前端焊缝特征，对小窗口图像的灰度值变化进行了分析，并设计了基于灰度值变化速率的焊缝边缘获取方法。利用图像复原，中值滤波、边缘获取、去除伪边缘、最小二乘法拟合等方法开发出具有较高适应性的图像处理算法。该算法的精度经验证，可以控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 范围内。

本文针对首钢 MOTOMAN HP6 机器人纠偏系统不开放的特性，进行了一系列的随机实验，通过数据对纠偏系统进行了建模与仿真，得到较为准确的纠偏电压与偏差量关系的模型，为控制器的离线设计创造了条件。

本文提出了一种实时焊缝跟踪技术，利用视觉传感器从熔池正前方观察焊枪枪尖投影点与焊缝的位置偏差，实时调整焊枪位置。同时在保障焊接稳定性的前提下，基于机器人纠偏卡的模型，设计了模糊 PID 控制器，保证机器人快速而稳定地调整焊枪位置。

将本文提出的实时焊缝跟踪技术分别在平板对接直缝试件、法兰环缝试件上进行试验，跟踪精度分别可以控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 和 $\pm 0.2\text{mm}$ 之内。考虑到图像处理的精度问题，其实际误差在 $\pm 0.3\text{mm}$ 和 $\pm 0.35\text{mm}$ 之内。

关键词：焊缝跟踪，视觉传感，图像处理算法，焊接机器人，模糊 PID

**STUDY ON AUTOMATIC SEAM TRACKING SYSTEM
BASED ON VISION SENSOR**

ABSTRACT

Most welding robot in use work in “teach” mode , while some others run in track planning mode. In welding process, there must be offset between blowtorch center and seam center. As we all know, welding is a complicated, nonlinear process with multi-interference, so that the thermal deformation, undercut, unfitness of butt joint and the change of seam gap length, which may affect welding quality directly , are all unpredictable. Therefore, based on “teach” mode or track planning mode, real time seam tracking can improve welding precision, especially fit for the welding of products hard for automatic welding to control, like those which may deform easily or must be loaded complicatedly,.

This essay is based on a pre-research project of the 11th 5-year program, with a background of groove-free aluminum alloy 2mm thin sheet welding, which are to be used in aircraft fuel container. We used impulsive TIG as our basic welding method, and did tracking experiments

on plane straight seam and plane flange seam, improving tradition “teach” mode welding robot to robot system with the function of real time seam tracking.

We first build a welding robot system, including:

1. Designed an appropriate dimmer-filter system, which can clearly gather welding image under base current, and solved the problem that the reflection damages image quality greatly.
2. Under Visual C++ environment, we use multi-thread technology, by the integrity of PC, A/D card, D/A card and image card, to complete image gathering, image processing, offset calculating and correct voltage sending at the same time.

We studied the characters of seam right before welding pool, analyzed the change of gray value in the small windows, and brought forward a edge searching method based on gray value change velocity. Developed a series of image process including image recovery, middle value filtering, edge searching, false edge discarding and least-squares procedure fitting, we successfully got an algorithm which can adapt well to different environment. The precision is in $\pm 0.15\text{mm}$.

Because of MOTOMAN HP6 robot's character that its correct system is not open to user, we did random experiments to get the relations between correct voltage and offset value, and set an accurate model through which we can debug controller parameters off line.

We bring forward a real time tracking technology, using CCD to gain offset between torch and seam center, so that torch position can be adjusted immediately. Under the condition that welding process must be kept stably, we design a new fuzzy PID controller, ensuring that robot can adjust torch quickly and stably.

We used this technology on plane straight seam, plane flange seam, and the precision can reach $\pm 0.15\text{mm}$ and $\pm 0.2\text{mm}$ respectively. Taking the precision of image process into account, the offset is no more than $\pm 0.3\text{mm}$ and $\pm 0.35\text{mm}$.

KEY WORDS: seam tracking , vision sensor , image process , welding robot , fuzzy PID ,

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除了文中已经著名引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：盛仲曦

日期：2009 年 2 月 2 日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密，在___年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“ ”)

学位论文作者签名：盛仲曦

指导教师签名：林涛

日期：2009年2月2日

日期：2009年2月2日

第一章 绪论

1.1 引言

目前,国内外已有大量的焊接机器人系统应用于各类自动化生产线上,这些焊接机器人系统从整体上看大多还属于第一代的“示教-再现”型或少量第二代的离线编程型机器人。这些焊接机器人的焊接路径和焊接参数是根据作业条件预先设置的,使他们可以在工作空间内高精度重复已经示教的动作。但这也带来一定局限性,那就是应变能力很差,对工件的装配精度要求较严,重复性要好^[1]。但在实际焊接过程中,作业条件是经常变化的,如焊接过程中工件受热及散热条件改变会造成焊道变形,工件加工和装配上的误差会造成焊缝位置和尺寸的变化。同时为了避免机器人工作时发生危险,操作人员不宜进入机器人的工作区域,使操作者不能近距离实时监视焊接过程并作必要的调节控制。所以,为了克服机器人焊接过程中各种不确定性因素对焊接质量的影响,提高机器人作业的智能化水平和工作的可靠性,需要焊接机器人系统能够在线实时调整位姿,保证焊枪对准焊缝中心,从而保证焊接质量,它是实现焊接过程自动化的重要研究方向。

1.2 焊缝跟踪技术发展现状

所谓焊缝跟踪就是在焊接时实时检测出焊缝的偏差,并调整焊接路径和焊接参数,保证焊接质量的可靠性。由于工件的加工误差、装夹精度以及焊接时的热变形等因素的存在,以示教-再现方式工作的弧焊机器人在焊接时常常因为焊缝和示教轨迹有偏差而导致焊接质量下降,所以焊缝跟踪是保证弧焊机器人焊接质量的一个重要方面。

我国早在 20 世纪 40 年代就已经开始关注焊缝跟踪技术,并且经过几十年的研究和实践,焊缝跟踪技术已经取得了长足的进步。70 年代前,焊缝跟踪主要以接触式传感实现焊缝跟踪,获取焊缝信息,但是精度很低;70 年代起,非接触式传感被进行了大量研究,但是因为结构复杂而没有很明显的成果。80 年代到 90 年代,闭环控制和焊缝跟踪技术已经开始慢慢成熟,大大提高了焊接质量和效率。目前,采用激光、光纤、CCD 传感、图像处理等高新技术,使得焊缝跟踪系统的性能和效率有了非常大的提高,焊缝跟踪的研究取得了非常大的成果。基于视觉传感焊缝跟踪技术的研究就是随着视觉传感器、计算机技术、图像处理方法和智能控制技术的发展而兴起的。

目前在机器人弧焊所使用的传感器中,电弧传感器和视觉传感器占有突出位置,其中电弧传感器用得最多,而视觉传感器被认为是最有前途得焊缝跟踪传感

器。视觉焊缝跟踪主要分为两个方面：一是主动视觉焊缝跟踪，研究内容包括提高激光跟踪的鲁棒性，跟踪中快速稳定的图像处理方法，传感器设计及焊缝跟踪中的控制问题。二是被动视觉焊缝跟踪，主要研究内容包括取像系统设计，图像处理算法及控制器设计。

自 80 年代以来，由于第二代机器人的研究，视觉传感技术作为焊接机器人智能部件，得到更迅速的发展，并在焊接领域的研究与应用方面展现更广阔前景。美国 Worthington Industries 公司开发一种焊缝跟踪设备对激光焊接进行跟踪，据报道其定位精度可达 $\pm 0.050\text{mm}$ 。加拿大 Modular Vision System 公司向市场上推出了一种三维激光视觉传感器，可对仅有 0.050mm 的根部开口或误差的待焊接头在高达 20m/min 的焊接速度下进行跟踪，跟踪精度为 0.02mm ^[2]。英国的 Meta Machines Ltd 的 Laser Pilot MTR 和 Laser Pilot MTF 激光光学焊缝跟踪系统可用于所有的弧焊方法和激光焊接，定位精度小于 0.1mm 。韩国的研究者研制了一个基于视觉传感的焊缝跟踪系统，该系统主要应用于钢管根部焊道的 GMAW 焊接，焊接过程中能够实时调整焊炬位置和焊接条件来获取良好的焊件，具有良好的焊缝跟踪能力，系统焊缝跟踪精度达到 $\pm 2\text{mm}/140\text{mm}$ ^[3]。印度的研究者利用视觉传感器拍摄焊缝图像，借助弧光来识别焊缝轨迹，根据得到偏差来控制步进系统实现纠偏运动，该实时焊缝跟踪系统跟踪精度可达 $\pm 0.2\text{mm}$ ^[4]。

我国从 20 世纪 60-70 年代后期就开始发展基于视觉传感的焊缝跟踪技术，其中哈工大、清华大学、上海交大、华南理工大学、华中理工大学、天津大学等高等院校在焊缝自动跟踪方面取得了许多应用成果。清华大学的研究者采用线阵 CCD 作为传感元件，并对光路结构进行了改进，通过对信号的数字滤波和图像处理获得焊缝中心位置，使用“开环自学习，闭环纠错”的轨迹控制算法，实现焊缝实时跟踪。该系统的焊接速度有 100mm/min ，焊接过程中 95% 以上的宽度值集中在偏离给定值 $\pm 10\%$ 范围内^[5]。哈尔滨工业大学的研究者研究了无辅助光源图像法 TIG 焊缝跟踪系统，该系统用被动视觉方法采集焊缝图像，采用了图像采集与焊接规范同步控制、阈值与图像协调处理、传感器可靠密封、冷却等系列有效措施，使系统即使在 300°C 的高温环境下也稳定可靠工作。该系统的静态检测精度为 0.07mm ，动态跟踪精度 0.2mm ，处理周期 300ms ，检测范围 13mm ^[6]。

综上所述，焊缝跟踪技术已经取得了一定的成果，而基于视觉传感的焊缝自动跟踪是未来的焊缝跟踪技术发展的必然趋势，可以预见，随着作为其三个核心技术的视觉传感技术、图像处理方法和控制技术的不断发展，视觉传感的焊缝跟踪技术的应用将会越来越广泛。

1.3 焊缝跟踪传感技术介绍

焊接过程传感器主要用于监测焊接过程状态,提供反应过程特征的信息,是实现焊接过程模型化和焊接过程自动控制的最重要部分^[7-8]。弧焊用传感器可以分为直接电弧式、接触式和非接触式三大类。按工作原理刻分为机械、机电、电磁、电容、射流、超声、红外、光电、激光、视觉、电弧、光谱及光纤式等。按用途分有用于焊缝跟踪、焊接条件控制及其他如温度分布、等离子体粒子密度、熔池行为等的研究。据日本焊接技术学会 1994 年所做的调查显示,再日本、欧洲及其它发达国家,用于焊接过程的传感器有 80%用于焊缝跟踪^[9]。

1.3.1 电弧式传感器

电弧式传感器利用焊接电极与被焊工件之间的距离变化能够引起电弧电流(对于 GMAW)或电弧电压(对于 GTAW 方法)变化这一物理现象来检测街头的坡口中心。其方式主要有摆动电弧传感、旋转电弧传感以及双丝电弧传感。因为旋转电弧传感器的选装频率可以叨叨几十赫兹以上,大大高于摆动电弧传感器的摆动频率(10Hz 以下),所以提高了检测灵敏度,改善了焊缝跟踪的精度,且可以提高焊接速度,使焊道平滑等。旋转电弧传感器常采用偏心齿轮的结构实现,而采用空心轴电动机的机构能有效减小传感器的体积^[10]。

图 1-1 为高速旋转扫描电弧传感器,导电杆作为圆锥的母线,绕圆锥轴线旋转(公转),而并不绕导电杆自身轴线旋转(自转),并且在锥顶处运动的幅度很小,这种结构调节扫描直径的方法是调节圆锥顶角,传感器需用一级齿轮减速传动,结构较大,影响了焊炬的可达性。韩国的 C-H Kim 还制作了一种高速旋转电弧传感器,如图 1-2 所示,这种传感器依靠导电嘴的偏心来实现电弧的旋转运动,导电嘴的偏心度就是电弧的旋转半径。虽然它的转动机构比较简单、紧凑,但其在高速旋转时,焊丝在导电嘴中必须以同样的转速旋转,这就加剧了导电嘴的损耗

电弧传感器具有以下优点:

- (1)传感器基本不占额外空间
- (2)不受电弧光、磁场、飞溅、烟尘的干扰,工作稳定,寿命常。
- (3)不存在传感器和电弧间的距离,且信号处理也比较简单,实时性好。
- (4)价格低。

所以电弧传感器已经获得了广泛的应用,目前使机器人弧焊中用得最多的传感器,已经称为大部分焊接机器人的标准配置。它的缺点使对薄板件的对接和搭接接头,很难跟踪。

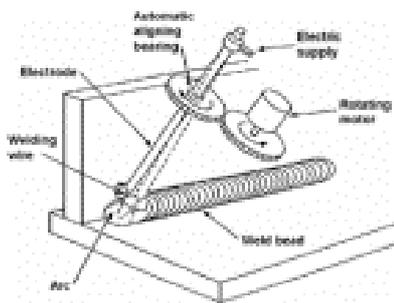


图 1-1 旋转电弧传感器

Fig. 1-1 Rotating arc sensor

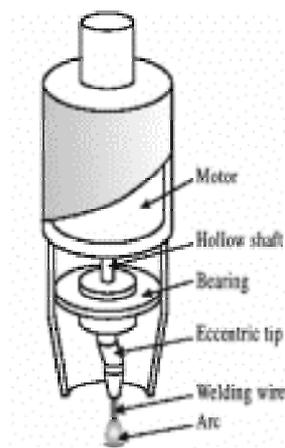


图 1-2 导电嘴偏心的旋转电弧传感器

Fig. 1-2 Rotating arc sensor
with eccentric tip

1.3.2 接触式传感器

接触式传感器一般在焊枪前方采用导杆或导轮和焊缝或工件的一个侧壁接触，通过导杆或导轮把焊缝位置的变化通过光电、滑动变阻器、力觉等方式转换为电信号，以供控制系统跟踪焊缝。其特点为不受电弧干扰，工作可靠，成本低，曾在生产中得到过广泛应用，但跟踪精度不高，目前正在被其他传感方法取代^[11]。

1.3.3 非接触式传感器

用于焊接的非接触式传感器很多，主要有电弧传感器、超声波传感器、温度场传感器及视觉传感器等。针对 GTAW 过程中存在的干扰如弧光、高温、振动和电磁场等，以及和过程本身的特点，提出了不同的非接触传感方法，如超声波法用于传感熔透^[12-15]，红外测温法传感焊接温度场^[16-20]，x 射线法传感焊接熔池形状^[21-23]，视觉传感器传感熔透、熔池形状、焊缝信息^[24-31]等。其中以视觉传感器最引人注目，因为它所获得的信息量最大，结合计算机视觉和图像处理的最新技术成果，大大增强了弧焊机器人的外部适应能力。本文也是采用的视觉传感器，在下面对它进行较详细的介绍。

据统计，焊工在焊接过程中判断是否正确和做出必要调整，所依据的信息来源 80%以上来自视觉。利用视觉传感技术来获取焊缝特征信息，具有信息量大、与工件不接触、远离电弧弧光和强热区、灵敏度和精度高、抗电磁干扰能力强及自动化程度高等优点，适合各种坡口形状，而且可以同时焊缝跟踪控制和焊接质量的控制，是最有发展前途的传感技术。

固体视觉传感器主要有 3 大类型：第 1 种是电耦合器件(CCD)，第 2 种是 MOS 图像传感器，又称自扫描光电二极管阵列(SSPA)，第 3 种是电荷注入器件(CID)^[32]。其中用的较广的是 CCD,如图 1-3 所示，分为线阵和面阵两种。线阵 CCD（电荷耦合器件）摄取的是一维图像，而面阵 CCD 摄取的是二维图像，能够提供最大的信息量，代表着目前传感器发展的最新阶段，因而应用日益广泛。在焊接机器人各种视觉传感器中，CCD 传感器因其性能可靠、体积小、价格低、图像清晰直观而受到了普遍重视。特别是 80 年代以来，CCD 与高性能的微机相结合产生的焊缝跟踪系统，使焊缝跟踪的研究跨上了一个新的台阶。



图 1-3 WATEC CCD 实物图及其内部结构示意图

Fig.1-3 Photo and structure of WATEC CCA

视觉传感方式在焊接机器人领域中的应用方向概括起来说主要集中在三个方面：焊缝视觉跟踪、焊缝成形视觉传感和焊缝路径的视觉规划。其中，焊缝视觉跟踪是焊接领域内一个一直比较活跃的研究方向，与一般的工业自动化操作机构以及搬运机器人相比，弧焊机器人不仅对运动控制要求较高，同时需要高精度的控制焊枪与工件之间的相对轨迹位置关系、运动速度以及焊枪姿态等。如果通过采用提高工件的加工精度、提高工装夹具的装配精度及严格控制机器人示教轨迹的方式，不但会使生产制造成本提高，而且限制了适用范围，并且对于那些焊缝坡口非均匀变化以及焊接过程中产生了热变形的情况，必须采取实时焊缝跟踪方法来调整机器人的运动轨迹，满足焊缝跟踪的使用要求和焊缝的质量要求。

在焊接机器人上应用的视觉传感器，根据照明光源的不同，工作方式可以分为“被动视觉”和“主动视觉”两种。其中，被动视觉是指照明光源为电弧或普通光源的视觉系统，其特点为被检测物体本身在图像中成像。而主动视觉一般是指使用具有特定结构的光源与摄像机组成的视觉传感系统，其特点为包含特征信息的图像由激光点或结构光在被检测物体表面上形成的光斑产生。

主动光视觉法是一种利用辅助光源，并基于三角测量原理的测量方法。由于

每一种视觉传感方法都需要解决在弧焊过程中存在的弧光、电弧热、飞溅、以及烟雾等多种强烈的干扰,因此采用主动视觉方式工作的传感器在克服这些干扰方面有很大的优势。根据使用的辅助光类型,这些传感器可分为结构光式和激光扫描式,其中,结构光式传感器采用单激光作为辅助光源,激光扫描式传感器采用扫描激光束作为辅助光源,由于光斑的能量集中于一点,抗干扰性能更好一些,但由于这种传感器需要扫描机构,所以体积较大。随着近年来激光二极管的功率的增大,体积较小的结构光式传感器逐渐成为主流。

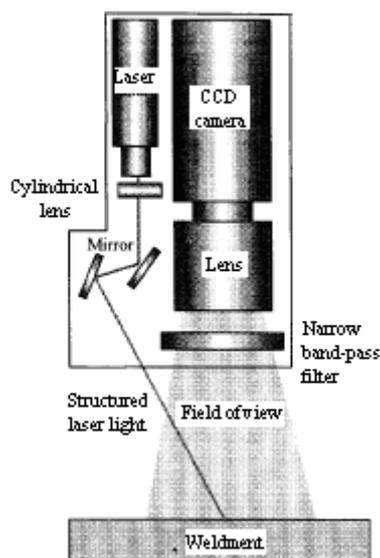
目前,英国的 META 公司已经成功的将主动视觉技术开发出焊缝跟踪激光传感器,如图 1-4 所示,其产品已经应用到 ABB、KUKA、LINCOLN、YASKAWA、OTC 等知名品牌机器人焊接过程控制中。



图 1-4 Meta 公司的焊缝跟踪传感器

Fig.1-4 Seam tracking sensor device

如前所述,激光扫描式的视觉系统是属于主动视觉的方法,大都是基于三角测量原理,其工作原理是大致相同的。首先是激光管发出的激光点光源通过光学扫描镜投射到被测工件的表面,由工件表面反射后的激光被 CCD 摄像头所接收,如图 1-5 所示,其中扫描镜的扫描频率一般在 5-20Hz 可调。通过测量反射光束与 CCD 主光轴的夹角,并结合已知的透射光束与扫描镜面的夹角以及 CCD 与扫描镜面的距离等数据,可以求得每一束激光在工件表面投射点与 CCD 镜面的距离,从而可以得到焊缝的端面剖面图,通过适当的图像处理算法,实现对焊缝进行视觉跟踪的目的。

图 1-5 激光视觉传感器组成^[117]Fig.1-5 Compose of the laser visual sensor^[117]

被动光视觉大都采用周围环境的光作为光源,由于该方法是直接摄取焊缝图像,因而不存在因热变形等因素所引起的超前检测误差,能获得接头和熔池的大量信息,设备简单,成本低,而且检测对象(焊缝中心线)与被控对象(焊炬)在同一位置,不存在检测对象与被控对象的位置差,即时间差的问题,因而更容易实现较为精确的跟踪控制^[33]。但其缺陷也是显而易见,由于是在极为强烈的弧光下摄取焊接熔池的图像,电弧的辐射光强度远远超过焊接熔池辐射光强,并且也超过了 CCD 传感器上限,对所摄取的图像有很大的影响,图像噪声很大,经常会把熔池内部的图像信息淹没掉,因此如何在极为强烈的弧光作用下,获取包括焊丝(或钨极)端头及熔池在内比较清晰的图像,将成为跟踪系统的关键之一,可以通过采用减光-滤光系统和焊接电流控制相结合的方法、图像处理算法以及调整合适的取像时刻等方法解决。

其中采用减光-滤光系统和焊接电流控制相结合的方法是来去除弧光的干扰。采用减光-滤光系统是滤掉弧光波长范围的光波,使摄像机在一个弧光对熔池辐射比例适当的较窄的光谱范围内获取熔池图像;瞬时降低焊接电流则是依据电流低时电弧光较弱,电弧的影响较小,控制焊机周期性的减少焊接电流,并在这个低电流的时刻摄取焊接熔池图像,使得在摄像机对熔池成像期间弧光的影响最小,以得到清晰的熔池图像。

另外一种解决的方法是采用激光频闪摄像获得较清晰的焊接区图像,频闪激光提供周期激光束来照亮焊接区,抑制电弧光的辐射强度。同时 CCD 快门和激光脉冲信号配合,同步打开,以获得清晰的焊接区的图像^[34]。

相比较而言,主动视觉须通过激光等辅助光源,虽然可以获得清晰的图像,

但是设备昂贵,系统复杂,很难投入到实际生产中;而因为被动视觉和人的视觉更为相似,所以它最有希望解决紧密对接焊缝和薄板搭接焊缝的跟踪问题。而且随着被动视觉传感的不断发展,其系统简单性的优势将越来越明显,减少甚至避免弧光干扰的效果也将越来越好。在本课题的研究中,就采用被动视觉方法。针对以被动视觉方式获得的图像易受到电弧的干扰的问题,有上述解决方法借鉴。

考虑到激光频闪摄像法的系统价格昂贵,其摄像头与激光照射装置在焊枪周围占据的空间较大,使用的机动性和灵活性较差,而且抗干扰能力也不是很理想。本文采用滤光-减光系统和控制焊接电流的方法,通过选取合适的滤光片和减光片,减少弧光对熔池图像的干扰,并且通过一定的图像处理算法以及调整合适基值电流和取像时刻等措施来克服这一问题。视觉焊缝跟踪本质上是一种机器视觉系统,因此可以参考和借鉴机器视觉系统的研究方法。和主动视觉焊缝跟踪相比,被动视觉焊缝跟踪应用中的图像内容复杂一些,相应的图像处理方法也比主动视觉焊缝跟踪复杂。所以在自主视觉焊缝跟踪技术中,图像处理技术占据重要的位置,其主要目标是获取焊缝的边缘及中心线等信息。

1.4 机器视觉的发展及应用介绍

人类感知外部世界主要是通过视觉、触觉、听觉和嗅觉等感觉器官,在这些感觉器官中,据统计有80%以上的信息是由视觉获得的。因此,对于智能机器人来说,赋予机器以类似人类的视觉功能对发展其智能化是极其重要的。

人类是通过眼睛与大脑来获取、处理与理解视觉信息的。随着信号处理理论与计算机的出现,人们试图用摄像机获取环境图像并将其转换成数字信号,用计算机实现对视觉信息处理的全过程,这样就形成了一门新兴的学科——计算机视觉,通常也可称为机器视觉、图像理解和图像分析。计算机视觉的研究目标是使计算机具有通过二维图像认知三维环境信息的能力,这种能力将不仅使机器能感知三维环境中物体的几何信息,包括它的形状、位置、姿态、运动等,而且能对它们进行描述、存储、识别与理解^[35]。

1.4.1 机器视觉的概念

机器视觉也称计算机视觉或图像分析与理解,是一门涉及人工智能、神经生物学、心理物理学、计算机科学、图像处理、模式识别等多个领域的交叉学科^[36]。

机器视觉是研究用计算机来模拟生物外显或宏观视觉功能的科学与技术,其首要目标是用图像创建或恢复现实世界模型,然后认知现实世界。机器视觉的发展不仅将大大推动智能系统的发展,也将拓宽计算机与各种智能机器的研究范围和应用领域。

1.4.2 机器视觉理论的发展

计算机视觉 (computer vision) 是一个发展十分迅速的研究领域, 对其的研究已有五十多年的历史, 它是在 20 世纪 50 年代从统计模式识别开始的。60 年代, MIT 的 Roberts 在 1965 年通过计算机程序从数字图像中提取出诸如立方体、楔形体、棱柱体等多面体的三维结构, 并对物理形状及物体的空间关系进行了描述。Roberts 的研究工作开创了以理解三维场景为目的的三维机器视觉的研究, 他首先使用程序成功地对三维积木世界进行了解释^[37], 此后, Huffman、Clowes 以及 Waltz 等人又对积木世界问题进行了研究并分别解决了由线段解释景物和处理阴影等问题^[23,24]。积木世界的研究反映了视觉早期研究中的一些特点, 即从简单的世界出发进行研究, 这些工作对视觉研究的发展起了促进作用, 但对于复杂的景物便难以奏效。但是许多研究者们对积木世界的创造性研究给了人们以极大的启发, 到了 70 年代, 已经出现了一些视觉应用系统。在 70 年代中期, B.K.P.Horn 教授在麻省理工学院 (MIT) 正式开设了“机器视觉”(Machine Vision) 课程, 并且 MIT 的人工智能 (AI) 实验室吸引了许多国际上知名学者参与机器视觉的理论算法、系统设计的研究。MIT 的马尔 (David Marr) 教授在 1977 年提出了一个不同于积木世界分析方法的计算视觉 (Computer Vision) 理论, 使关于视觉的研究前进了一大步, 该理论在 80 年代成为了计算机视觉研究领域中的一个十分重要的理论框架^[38-42]。

根据 Marr 教授的视觉计算理论, 视觉问题是一个信息处理过程。一个视觉系统应分为三个层次^[43]: 计算理论层次, 表示 (representation) 算法层次和硬件实现层次。在计算理论层次上, 计算机视觉要回答视觉系统的计算目的是什么和为什么这一计算是合适的, 也就是在这个层次上, 规定了视觉系统最终目的, 或视觉系统输入是什么和输出是什么, 输入和输出之间的关系是什么。Marr 给出了一个反映视觉系统输入和输出关系的总目标: 系统输入是二维灰度图像, 输出是三维物体的形状、位置和姿态。在计算理论层次上规定了视觉系统的目标后, 就需要用某种表示方法来描述视觉系统的输入和输出, 并设计算法实现该目标, 这就是表示和算法层次。算法与表示有关, 对于同一计算理论, 不同的表示可以有不同的算法去实现这一计算。最后一个层次是对一表示方法和设计好的算法用硬件去实现, 即硬件实现层次。

Marr 从视觉计算理论出发, 将视觉系统划分为自下而上的三个阶段, 称之为视觉的早期阶段、中期阶段和后期阶段, 不同的阶段有不同的工作目的和工作内容。第一阶段 (早期阶段) 主要采用图像处理技术对原图像进行处理, 提取原图像中的一些基本特征, 这些特征的集合称为基元图 (灰度表象), 基元图由二维图像中的边缘点、直线段、曲线、顶点、纹理等基本几何元素或特征组成; 第

二阶段(中期阶段)通过立体视觉和运动视觉等来计算物体表面的法线方向和深度距离,形成对物体的 2.5 维(表面表象)描述。2.5 维是一种形象的说法,意思是部分的、不完整的三维信息描述,在这一阶段重建出以观察者坐标系下描述的部分三维物体形状。为完成这一任务,有许多并行的相对独立的方法,如立体视觉、运动分析、由灰度恢复表面形状等。第三阶段(后期阶段)为 3 维模型表象,即物体本身在某一固定坐标系下的描述,得以对物体完整的描述。然后 Marr 进一步分析了 3 维模型表象与识别的关系,提出了模块组织学。

Marr 的视觉理论具有划时代的意义,成为计算机视觉研究的主流思想。近年来的计算机视觉研究主要是围绕这一理论框架展开的,虽然这一理论还不是十分完善的,比如它把视觉看成一个完全被动的过程,缺乏与环境的交流;并且他的理论局部优先,引入大量噪声等^[42],但是它给我们提供了许多宝贵的思想和研究方法。

对计算机视觉的全球性研究热潮是从 20 世纪 80 年代开始的,到了 80 年代中期,计算机视觉理论获得了蓬勃的发展,新概念、新方法、新理论不断涌现。根据 Marr 教授的视觉理论框架,世界各国的研究者对计算机视觉系统的各个研究层次及各个阶段的各个模块,进行了大量的研究工作,并提出了相应的解决办法。但通用的视觉系统还是不能实现。随着生理学家对生物视觉感知研究的深入,以及计算机视觉研究者对 Marr 视觉理论框架的局限性的进一步认识,许多学者提出了很多新的理论和方法,例如犹太大学 Thompson 提出的定性(Qualitative)视觉观点^[43];美国宾夕法尼亚大学计算机系 Bajcsy 提出的主动(Active)视觉观点^[44];罗切斯特大学 Ballade 和 Brown 提出的活跃(Animate)视觉观点^[45];美国马里兰大学计算机视觉研究实验室的 AloimonosY 提出的目的(Purposive)视觉观点^[46]等。

随着科学技术的不断发展及人们对视觉技术研究的不断深入,计算机视觉技将得到不断的充实和补充,并且会在越来越多的领域中得到应用。

1.4.3 机器视觉理论的应用

机器视觉技术正广泛地应用于各个方面,从医学图像到遥感图像,从工业检测到文件处理,从毫微米技术到多媒体数据库。可以说,需要人类视觉的场合几乎都需要机器视觉。但是,也有许多人类视觉无法感知的场合,如精确定量感知、危险场景感知、不可见物体感知等,在这些方面机器视觉就更显示出其优越性。

其典型应用主要为:零件识别与定位、产品检验、移动机器人导航、遥感图像分析、医学图像分析、安全鉴别、监视与跟踪、国防系统等等。

1.4.4 机器视觉理论存在的困难

人们对机器视觉进行了卓有成效的研究，并且在各个领域得到了广泛的应用，但机器视觉技术仍处于并不成熟的阶段，还面临着诸多困难，如要体现在如下几方面：

1. 图像多义性

三维场景被投影为二维图像，深度和不可见部分的信息被丢失，因而会出现不同形状的三维物体投影在图像平面上产生相同图像的问题。另外，在不同视角获得的同一物体的图像也会有很大的差异。

2. 环境因素的影响

场景中的许多因素，如照明、表面颜色、摄像机以及空间关系变化都会对生成的图像有影响。因此，当任何一个因素发生变化时，都会对图像产生影响。

3. 知识导引

同样的图像在不同的知识导引下，将会产生不同的识别结果，可能产生不同的空间关系，也就具有不同意义。

4. 大量数据

灰色图像，彩色图像，深度图像的信息量十分巨大，如果处理的是图像序列，则数据量更大。巨大的数据量需要巨大的存储空间，同时不易实现快速处理，为了解决面临的诸多问题，研究人员不断寻求新的途径和手段，不断深入研究，必将促进机器视觉技术不断的发展和在越来越多的领域中应用。

1.5 本课题研究意义及内容

本文是基于上海交通大学和上海航天精密机械研究所“十一五”合作项目——“航天器新型铝合金结构机器人焊接技术”为背景，采用视觉传感技术，针对生产中普遍应用的脉冲 TIG（钨极惰性气体保护焊）焊接工艺进行研究，实现 2mm 厚 LF6 铝合金平板直缝和法兰环缝的弧焊机器人实时焊缝跟踪技术，对于我国焊接机器人智能化发展及应用具有一定的现实意义。

本文主要针对 2mm 厚 LF6 铝合金薄板脉冲 TIG 焊接进行研究，具体内容包括：

1. 基于视觉的弧焊机器人软硬件系统的研制。针对航天构件焊接产品的工艺复杂、多品种、小批量、质量和精度要求高的特点，研制一套基于视觉传感的焊接机器人系统。该系统在原有“示教-再现”型机器人的基础上增加了视觉传感系统，设计了接口电路，通过在计算机 Visual C++环境中开发控制软件，实时采集焊缝图像，进行图像处理，实现在线焊缝跟踪。

2. 图像处理技术。本文根据脉冲 TIG 焊接特点和铝合金反光特性, 分析、设计了减光-滤光系统; 结合当前发达的计算机图像处理技术, 分析图像特征, 开发出具有适应性强、鲁棒性高的图像处理算法。
3. 基于视觉的弧焊机器人焊缝跟踪算法的研究。本文在机器人粗略示教的基础上, 利用视觉传感器实时检测焊枪和焊缝中心的偏差, 并设计了合适的控制器, 控制纠偏电压, 保证焊接过程稳定的同时, 更快速度的调整焊枪与焊缝的偏差量, 实现在线跟踪。
4. 基于视觉的弧焊机器人系统的试验验证。本系统是利用 CCD 实现焊缝实时跟踪, 在平板直缝和法兰环缝的焊接试验中, 利用本系统进行了试验分析: 在线实时焊缝跟踪技术解决了大工件焊接过程中, 由于焊缝变形造成焊枪与焊接轨迹偏移的问题。在本项目焊接机器人系统上进行焊缝跟踪试验, 直缝运动轨迹误差 $< 0.3\text{mm}$, 环缝运动轨迹误差 $< 0.35\text{mm}$ 。

第二章 实验硬件系统

2.1 机器人焊接系统介绍

根据航天器新型铝合金结构机器人焊接要求,需要设计一套集机械、计算机、微电子于一体的机电一体化控制系统。机电一体化技术是 20 世纪 50 年代以来,随着电子技术、计算机技术,特别是微电子技术和信息技术的发展而发展起来的新技术。机电一体化技术是机械技术同微电子技术和信息技术有机结合而成的一种高级综合性技术。因此,本项目从机电一体化设计理论出发,研究了航天器新型铝合金结构机器人焊接系统的设计方法,在这里首先介绍一下机电控制系统的基本功能和构成。

2.1.1 控制系统的基本功能

机电一体化产品的控制系统是一个以计算机为核心的测量和控制系统,它将来自各传感器的检测信号与外部输入命令进行集中、存储、分析、转换,根据信息处理结果,按照一定的程序和节奏发出相应的指令,控制整个系统有目的地运行。由于这类控制器主要用于设备控制、过程控制,必须与作业过程地机械设备相匹配,因此通常称为工业控制机(简称工控机)。它的基本功能应包括以下几点。

- (1) 实时的信息检测、转换和控制功能。
- (2) 人机交互功能。
- (3) 和机电部件接口的功能。
- (4) 对控制软件运行的支持功能。^[47-49]

除上述基本功能外,为了提高控制器的可靠性和使用维护性能,控制器的设计中还经常包括抗干扰的功能、诊断维护的功能、远程通信服务的功能等。

2.1.2 控制系统的基本构成

如图 2-1 所示,机电一体化设备的基本模型中,控制器实际上是一个以计算机为核心的系统,机电控制的过程就是控制器对信息进行检测、分析、变换、处理、决策,然后输出控制运动信息并显示有关信息。由图可见,信息流主要集中在人机界面、检测机构和控制器,其中控制器是一个核心转换器,它接收输入信息,并产生输出信息。机电控制系统要想完成信息的检测、分析和转换处理,输出控制信息,系统就需要由软件和硬件两部分构成共同完成控制任务。这里首先

介绍机电控制系统硬件部分设计的基本原则^[50-52]。

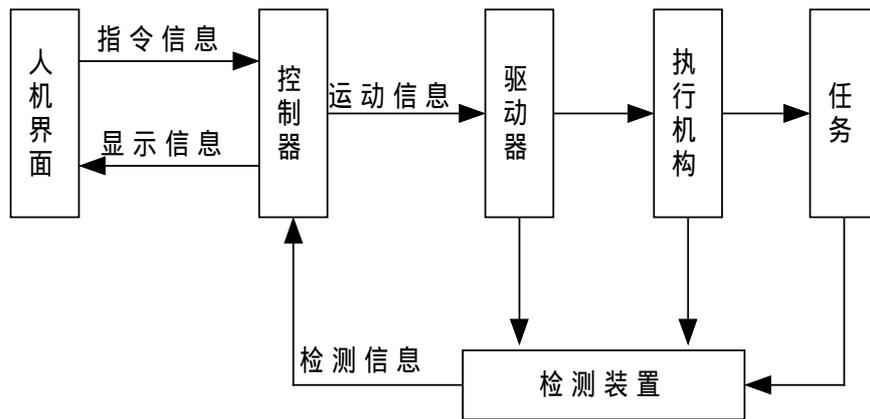


图 2-1 机电一体化设备的基本模型

Fig.2-1 Mechanic and electronic integration model

机电控制系统的基本构成主要为以下几个方面。

- (1) 中央处理单元 (CPU)
- (2) 存储器
- (3) 检测装置
- (4) 机电一体化控制系统的 I/O 子系统
- (5) 人机接口
- (6) 系统支持功能
- (7) 现场总线

2.1.3 机器人焊接平台设计

从本项目和航天 800 所实际应用角度出发,该机器人焊接系统必须能够满足以机器人和工控机为控制器的脉冲交流 TIG 焊。因此,在本机器人焊接系统中,对原有弧焊专用控制柜进行改造,增加切换开关,实现工控机和机器人对焊接电源的控制。该机器人焊接硬件系统组成如下图 3-1 所示,机器人焊接硬件系统实物图如下图 2-2 所示。

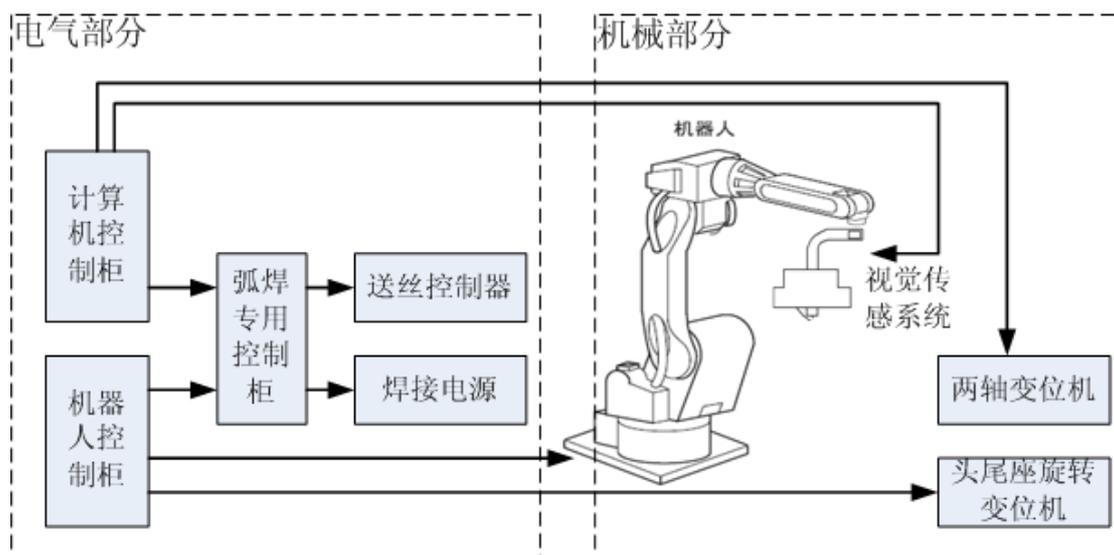


图 2-2 机器人焊接硬件系统组成

Fig.2-2 Robot welding system diagrammatic sketch



图 2-3 机器人焊接硬件系统实物图

Fig.2-3 Photo of robot welding system

从上图可以看出，按照机电一体化设计理论中机电设备基本模型，可把整套机器人焊接平台的设计划分为四个部分：执行机构、控制系统、检测装置和驱动器。

2.1.3.1 执行机构

本项目执行机构包括焊机、机器人本体、头尾式变位机和两轴变位机。在本次项目中，我们日本 OTC 公司生产的 INVERTER ELESON 500P 型交直流两用

TIG 焊接电源,日本 OTC 公司生产的 CM-271 型送丝机和 HC-71 型送丝控制箱。翻转变位机采用头尾式,配合焊接机器人的输出轴设计制造,用于筒段对接环缝和筒段法兰环缝的焊接。变位机用外部轴(电机型号为:SGMRS-13A2A-YR11)(含 RV 减速机,型号为:HW9381641-A)(外部轴电缆长度为 12 米)均由焊接机器人厂家提供。两轴变位机主要采用机械部件、伺服机构、运动控制卡、工控机(另加数字手操器)的硬件组合方式。应用软件采用 VC++ 编写,实现焊接过程中对变位机的动作要求。变位机主要采用伺服驱动器封装的应用模块 JUSP-NS115 来实现精确位置定位。焊接机器人系统为引进的日本安川电机公司的 HP6 型焊接机器人,以及 1.3Kw 协调控制外部轴,同时增加了传感器接口及纠偏卡、I/O 接口等。

2.1.3.2 控制系统

控制系统主要包括:工控机(含板卡)、接口电路、显示器、操作台、配电和保护等,以及相关控制软件。控制系统完成整个系统的管理、状态监视、2 轴变位机控制、图像处理、控制算法、参数调整、通讯、信息显示、参数设定等。根据控制系统完成功能以及与外部设备交互的不同,可将其分为五个部分:工控机与焊接电源、工控机与机器人控制柜、工控机与传感系统、工控机与两轴变位机、人机界面,下面分别给予描述。

1. 工控机与焊接电源

在采用脉冲交流 TIG 焊时,需要采集焊接电源的起弧成功信号(WCR)和峰值期间信号,其中 WCR 信号用于判断是否起弧成功,峰值期间信号用于视觉传感器确定采像时刻。同时,工控机必须能够实时调节基值电流、峰值电流和送丝速度。因此,工控机与焊接电源之间需要如下图 2-4 所示的信号连接。其中 WCR 和峰值期间信号占用数据采集卡 PCI-1762 两路数字量输入信号,而基值电流、峰值电流和送丝速度占用数据采集卡 PCI-1723 三路模拟量输出,并通过接口电路和弧焊专用控制柜放大滤波处理。

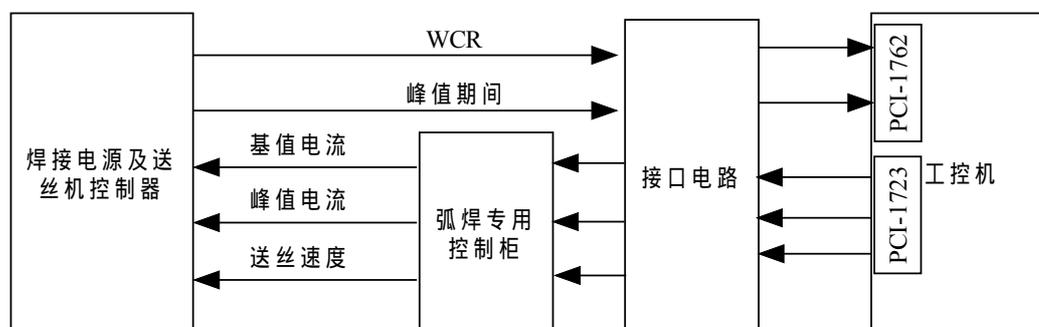


图 2-4 工控机与焊接电源及送丝机控制器信号流图

Fig.2-4 The connection of Industry Control PC and welder/wire feeder

2. 工控机与机器人控制柜

工控机与机器人控制柜之间信号包括机器人传感功能输入,专用输入输出和通用输入输出。机器人传感功能输入用于机器人外接视觉传感器,实现机器人运动轨迹的实时修正。专用输入输出用于工控机监视机器人状态信号以及有关启动、伺服上电和急停等的外部信号。通用输入输出用于用户自定义信号的实现。

为实现上述功能,占用了 PCI-1723 中 4 路模拟量输出信号, PCI-1762 中 12 路数字量输入信号和 4 路数字量输出信号,工控机与机器人控制柜之间需要如图 2-5 所示的信号连接。

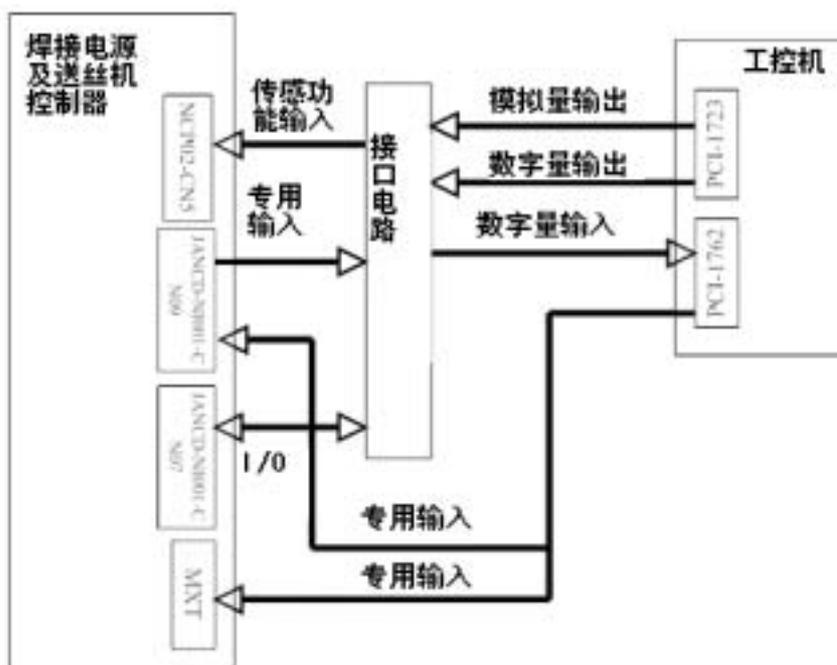


图 2-5 工控机与机器人控制柜信号流图

Fig.2-5 The connection of Industry Control PC and Robot Controller

3. 工控机与传感器

该机器人焊接系统中传感系统由 CCD 组成,通过视频线将 CCD 视频点阵信号传输到工控机。另外,考虑到在不需要 CCD 的场合下关闭 CCD 电源以增长其使用寿命,我们在数据采集卡上增加了 CCD 电源信号的开关,占用了 PCI-1762 两路数字量输出信号。因此,工控机与传感系统之间需要如图 2-6 所示的信号连接。

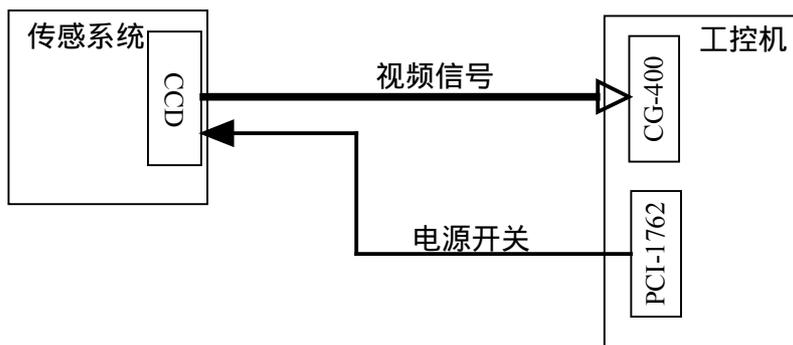


图 2-6 工控机与传感系统信号流图

Fig.2-6 The connection of Industry Control PC and Sensor System

4. 工控机与两轴变位机

工控机与两轴变位机之间主要是运动控制卡 PCI-1240U 和伺服驱动器信号连接，具体的信号流图参见运动控制卡 PCI-1240U 说明书。除了以上信号，增加伺服驱动器上电开关和两个电机制动开关信号，占用 PCI-1762 三路数字量输出。因此，工控机与两轴变位机之间需要如下图 2-7 所示的信号连接。

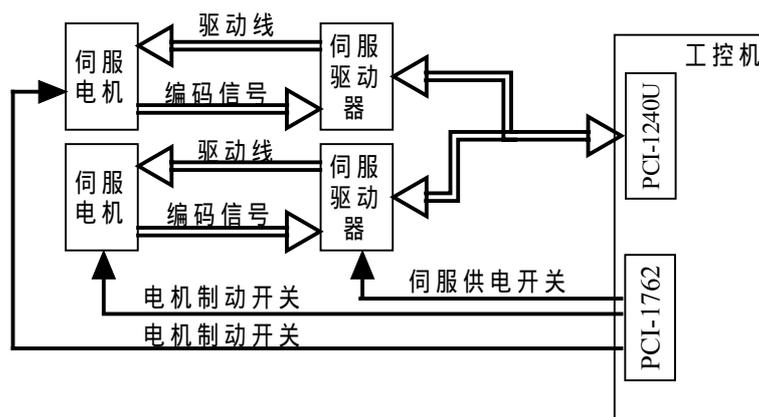


图 2-7 工控机与两轴变位机信号流图

Fig.2-7 The connection of Industry Control PC and Positioner

5. 人机界面

这里的人机界面主要包括操作面板、手操器和软件界面。其中操作面板包括系统急停、伺服上电灯、视觉上电灯、手动自动选则开关、面板手操器控制切换开关、两轴变位机手动操作开关等设备。其中手操器包括伺服上电灯、急停按钮、两轴变位机手动操作开关。



图 2-8 跟踪程序主界面

Fig.2-8 Tracking program

2.1.3.3 检测装置

本项目中检测装置指的就是视觉传感系统。我们将在本章第二节里面做详细介绍。

2.1.3.4 驱动系统

本文中的驱动器主要指数字量和模拟量的信号调理电路。两轴变位机的伺服驱动器以及机器人本体的伺服驱动均是购买现成的产品实现。

考虑到电路设计冗余，将全部 PCI-1723 中 8 路模拟量输出信号扩展并设计其光电隔离电路，扩展 PCI-1762 中 16 路输入信号并设计其光电隔离电路，接口电路图如下图 2-9 所示，自制接口电路实物图见 2-10 所示。（注：为了使电路图显示清楚，模拟量输出和数字量输出仅给出单路电路图）

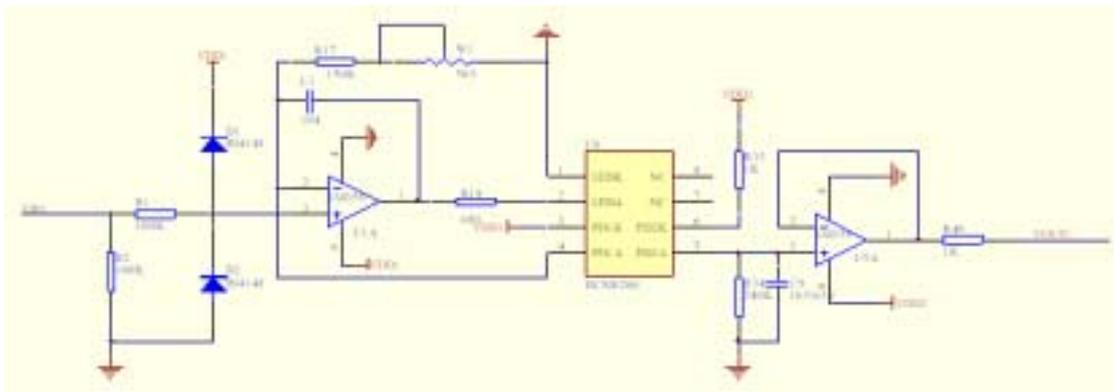


图 2-9 模拟量隔离电路

Fig.2-9 Analog quantity separation circuit

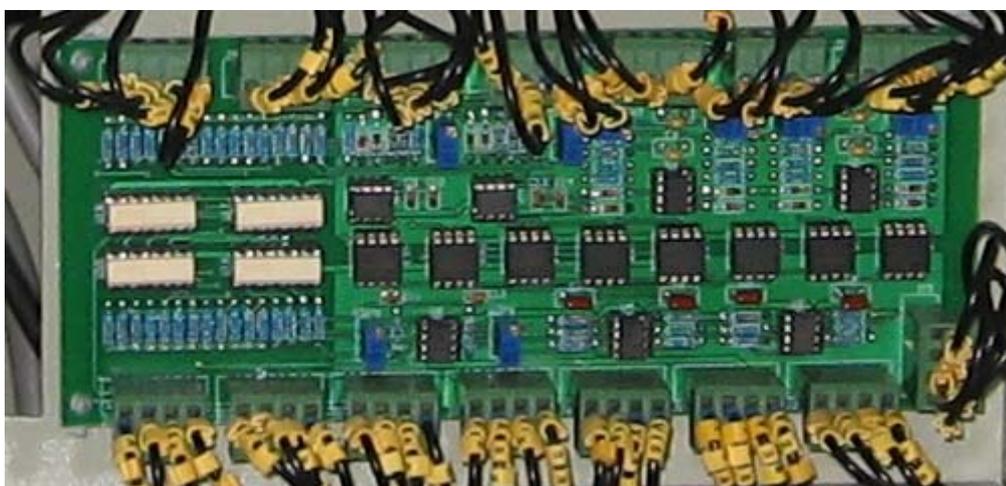


图 2-10 自制接口电路实物图

Fig.2-10 Interface card photo

2.2 CCD 视觉传感器系统

本次实验中采用的 CCD 视觉传感系统包括三部分，包括传感器金属框架结构，WATEC 公司的 WAT-902H 型号的 8 倍变焦 CCD 摄像机，以及大恒图像的 CG400 图像采集卡。

本视觉传感器采用模块化的设计理念，按结构可将整个传感器分为以下几个部分（图 2-11）：二次反射成像模块，送丝调节模块和减光-滤光模块。

传感器采用二次反射成像的原理获取图像，有两个明显的优点：一方面，只需调节反光镜即可达到调节视野的目的而无需对整个传感器进行结构变化，避免整体影响；另一方面，二次反射可有效地减小焊接过程中如飞溅、烟尘等对 CCD 摄像机镜头的影响，提高设备的使用寿命，减少设备的维护成本。

送丝调节模块实现送丝位置的局部调整，避免因扎丝等问题影响焊接质量，为航空航天等精密焊接提供保障。视觉传感器采用半开放式设计，即使在机器人

焊接小直径法兰时,第六关节旋转到很大角度,在传感器内部的送丝机构仍然可以确保送丝的顺利进行。

在下一节中,我们将对减光-滤光模块进行详细分析。

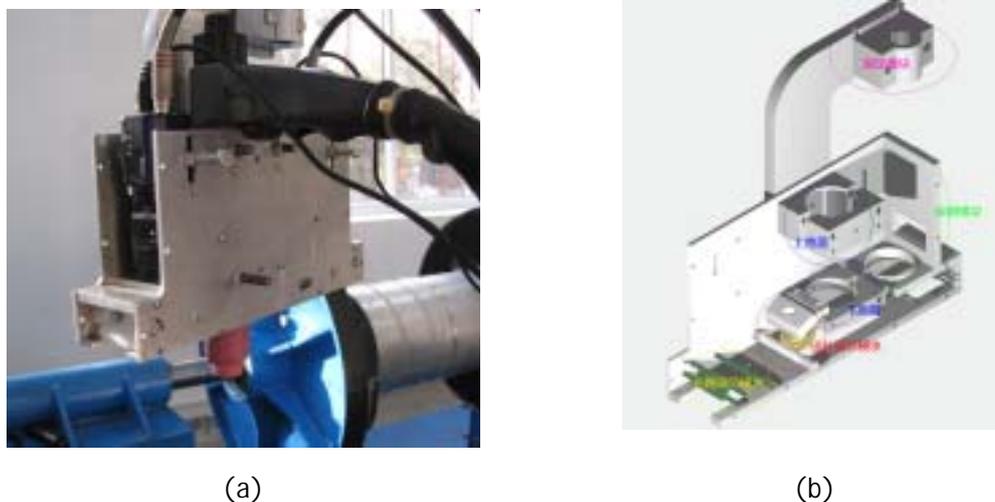


图 2-11 视觉传感器 (a)视觉传感器实物图 (b)视觉传感器示意图

Fig.2-11 Vision sensor

(a)Vision sensor photo (b)Vision sensor diagrammatic sketch

2.3 减光-滤光系统设计

2.3.1 铝合金 TIG 焊缝区及熔池光谱分析

利用图像传感的方法进行焊缝跟踪,首先要获得熔池图像。被动式直接视觉图像传感监控焊接过程的方法所使用的窄带滤光传感器设计原理是:根据某种材料的焊接电弧光谱选中某一中心波长,此波长对应的金属谱线的光谱强度大于此谱线周围的连续光谱的辐射强度,通过滤光片将此波长以外的弧光滤掉,因而可以利用熔池自身的辐射成像^[53,54]。上述窄带滤光方式可行的原因在于熔池辐射光谱与熔池周围母材固态金属的辐射或反射光谱存在差别。然而对于铝合金而言,采用上述方法却遇到了困难,有两个主要原因:一是因为如图 2-12, 2-13 所示,铝元素光谱中比较明显的部分和氦元素光谱重合,如果我们选择通过波长为该部分的窄带滤光片,就不可避免地会引入氦元素辐射光线,影响图像质量。二是基于焊缝跟踪的考虑,即我们需要看到熔池前端部分和焊缝部分,而这两部分状态并不一样,熔池部分处于熔融状态,而焊缝部分仍然是固态铝合金状态。如果我们采用窄带滤光,选择的通光范围必然会引起这两部分取像的差别,从而影响后续的图像处理。对于铝合金焊缝跟踪而言,必须改善原有基于熔池图像获取的窄

带滤光方式, 发展合适的滤光系统, 来获取铝合金焊接熔池的图像。

经过分析, 铝合金氩弧 TIG 焊接条件下的弧光光谱分布基本规律是在强度相对较低的连续光谱上叠加许多强度不等的其它谱线所组成的, 在不同的工艺参数下(焊接电流, 焊接电压), 光谱分布会有轻微变化, 但基本规律不变^[55]。近熔池表面区光谱主要由铝原子光谱, 铝离子光谱和熔池金属黑体辐射产生的连续光谱组成, 弧柱区的光谱主要由氩原子和离子的谱线组成, 此外还含有其它金属的蒸汽谱线。由焊接电弧激发条件下氩和铝的原子和离子谱线分布图(图 2-12, 图 2-13)可以看出, 在 380-760nm 可见光谱段, 铝谱线条数和分布密度远小于氩, 铝谱线相对强度最高的波长约 396nm, 而在其它的波长范围内相对强度都非常低, 但是在此范围附近, 高强的氩谱线的非连续光谱谱线排列紧密, 即使谱线窗口选择很窄, 窄带滤光片也很难保证窗口谱线的纯净, 铝谱线仍然可能会被氩谱线淹没, 同时焊接过程电流的变化引起各个离散谱线的强度的变化也会导致窗口仍然会被其它谱线穿透污染所取得的图像, 因而无法分辨图像的细节。另外, 普通 CCD 摄像机对此波段的可见光响应灵敏度低。因此采用此窄带滤光的方式获取铝合金 TIG 焊熔池图像的方法是不可行的。

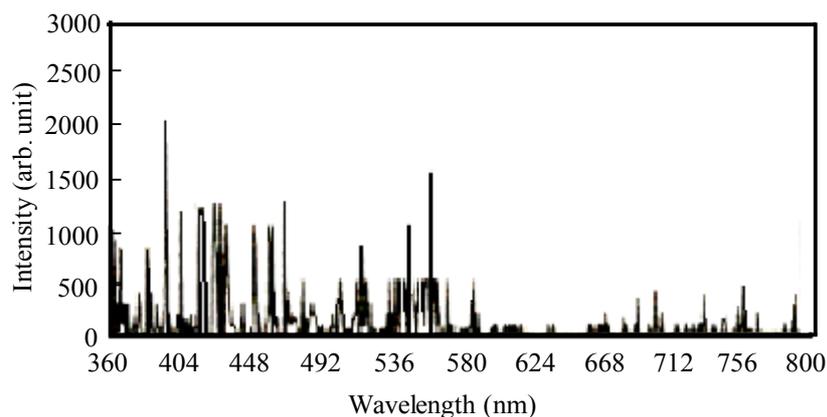


图 2-12 氩元素特征谱线强度分布^[56]

Fig.2-12 The distribution of the characteristic spectrum of Ar

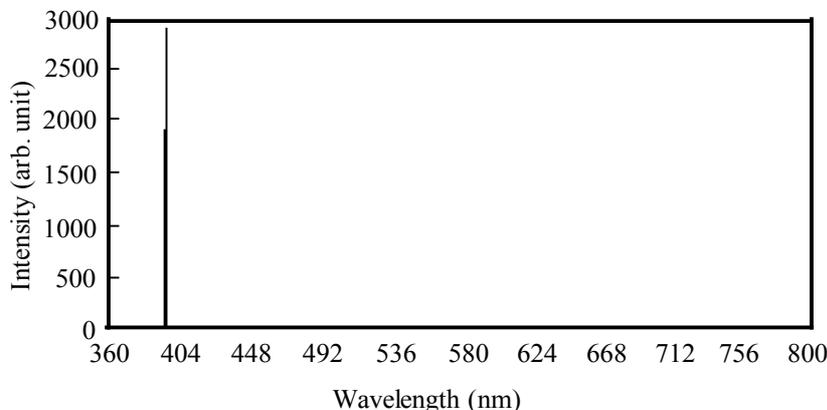


图 2-13 铝元素特征谱线强度分布^[56]

Fig.2-13 The distribution of the characteristic spectrum of Al

2.3.2 实验用减光 - 滤光系统设计

通过分析铝合金实际氩弧 TIG 焊接光谱分布图,可以发现,在近红外区的波长范围内(580nm-720nm),铝合金电弧光谱主要由连续光谱组成,氩谱线和其他金属和非金属谱线分布微弱,甚至在 640nm-670nm 区间基本没有氩谱线分布。同时实验证明:在焊接电流大于 40A 的情况下,电流波动范围为 $\pm 20A$ 时在近红外区的光谱区间内连续光谱的强度变化不明显,也就是说,如果照明光源的光谱选择在上述范围之内,则光照条件是相当稳定的。根据以上分析及试验可以设想,如果利用电弧本身近红外区的连续光谱照明,则熔池图像会极少出现其它各种特征谱线的干扰,而且大大降低对滤光片的要求。但是如果仿照用于不锈钢熔池图像传感器的设计原理,只是采用简单的窄带滤光方式设计传感器,仍然不会成功,原因是:其一,在近红外区范围内连续光谱强度较低,窄带滤光方式往往导致光照不足,也就是光源强度过低,图像模糊;其二,在连续光谱区内仍然经常出现一些强度较低的谱线,这些谱线的强度一般低于在 300nm-600nm 区域出现的大多数金属谱线的强度,但高于连续光谱的强度,因此会形成光源的强度波动。解决的办法是拓宽滤光片的通光范围,利用宽广范围内的连续光谱及其强度较低的离散光谱共同作为照明光源,提高传感系统的抗干扰能力,同时辅助以适当的减光措施,称之为宽带滤光系统。再结合了实验效果,在本次项目中采用了通过波长范围为 590 - 680nm 的滤光片,中心波长为 $620\pm 7\text{nm}$,半宽 15nm,峰值透过率为 4%(图 2-14),同时辅以透过率为 10%的减光片,在取像上收到了很好的效果(图 2-15)。

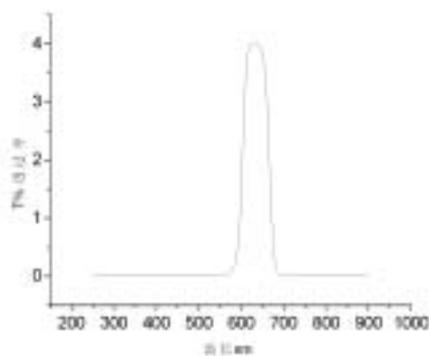


图 2-14 滤光片光谱图

Fig.2-14 Filter spectrogram

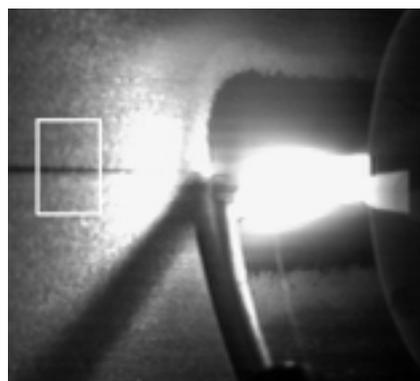


图 2-15 在此滤光-减光系统下采集到的图像

Fig.2-15 Image under this condition

2.4 实验系统的标定

该跟踪系统是基于一种简易标定的跟踪方法,只需对图像中的固定区域进行

距离和像素的标定并确定焊枪枪尖投影点的坐标。如图 2-16 枪尖正下方区域为本次实验种实现纠偏需要计算的区域，Y 轴方向上的标定结果为 $0.1163\text{mm}/\text{pixel}$ 。同时，对于控制对象，即焊枪枪尖点在工件上的投影坐标也作了标定，结果为 $(310, 170)$ 。

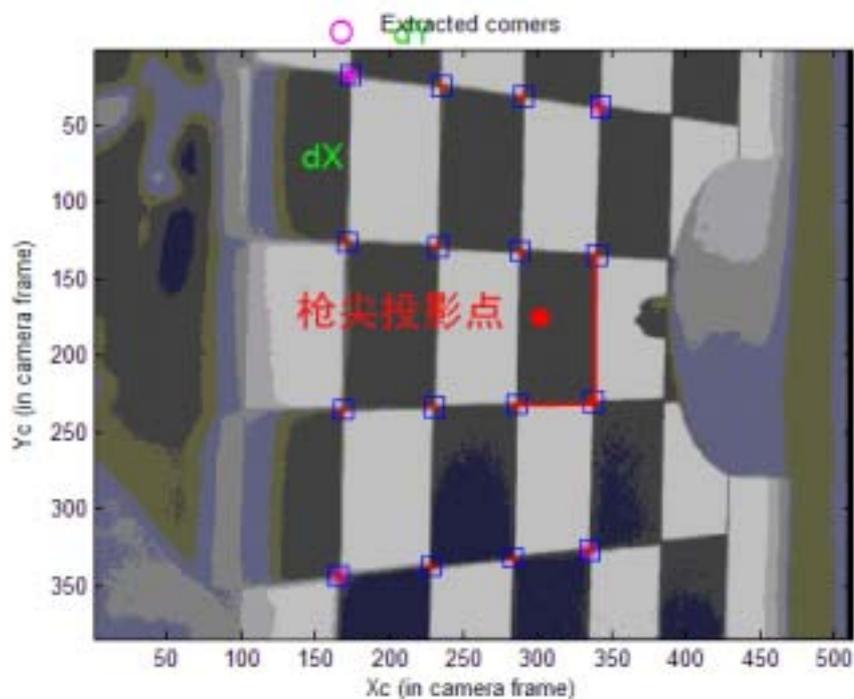


图 2-16 CCD 分辨率标定示意图

Fig.2-16 CCD resolution calibration

2.5 本章小节

本章主要介绍了本文焊缝跟踪系统使用的试验硬件系统，主要包括如下内容：

1. 焊缝跟踪系统的焊接机器人平台，主要由首钢 MOTOMAN HP6 机器人系统，变位机，视觉传感系统，工业控制计算机及焊接设备系统等部分组成。
2. 视觉传感机构，包括二次反射成像模块，减光-滤光模块，送丝调节模块。
3. 减光-滤光系统。通过对铝元素和氩元素光谱的深入分析，并结合实际实验结果，设计了适用的减光-滤光系统，取到了清晰焊接过程中的实时焊缝图像。
4. 对图像处理中需要用到的 CCD 的在纠偏方向上的分辨率进行了标定，并确定了跟踪的控制对象枪尖投影点的在图像中的坐标。

第三章 焊接图像采集与处理

3.1 本项目焊接件的性能及焊接工艺介绍

本项目研究背景是针对航天器新型铝合金结构研究其弧焊技术，该结构为 LF6 铝合金 2mm 薄板，具有筒段纵缝、筒段环缝、箱体法兰环缝和箱底法兰环缝等多种焊缝形式以及薄壁焊接的特点。模拟件示意图如图 3-1 所示：

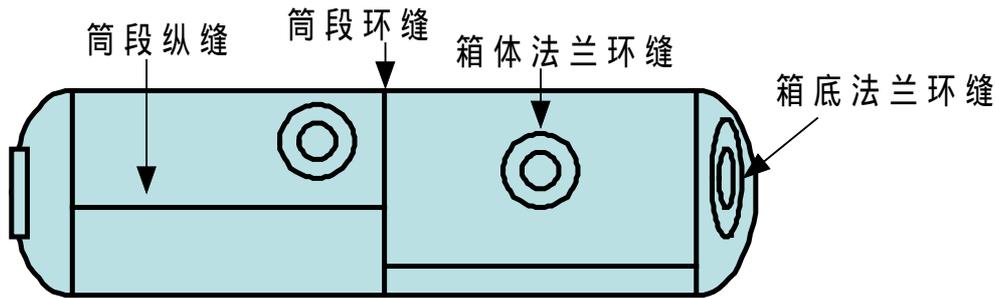


图 3-1 航天器贮箱结构工件示意图

Fig.3-1 Aircraft fuel container

LF6 薄板焊接的一个重要特点是焊接变形大，正是基于该铝合金结构加工和装配存在的焊缝位置偏差和间隙的变化，以及焊接过程受热和散热条件的变化，容易导致焊道变形的特点，设计了基于工控机为主控制器的焊缝跟踪系统。同时为了尽量减少变形，我们使用较严格的工装。在焊枪可达的前提下，尽量使压板靠近焊缝，并要求均匀压紧，尽量减少装配间隙消除或缓和焊接变形。在本文提到的实验中，均使用了全接触式工装。同时采用较大峰值电流、较快速度进行焊接，以提高屈服极限，增大抗变形能力和抗热裂纹的能力。

3.2 不同工艺参数下所采得的图像对比

3.2.1 在实时焊接图像采集中影响被动视觉的因素

被动光视觉大都采用周围环境的光作为光源，由于该方法是直接摄取焊缝图像，因而不存在因热变形等因素所引起的超前检测误差，能获得接头和熔池的大量信息，设备简单，成本低，而且检测对象（焊缝中心线）与被控对象（焊枪）在同一位置，不存在检测对象与被控对象的位置差，即时间差的问题，因而更容易实现较为精确的跟踪控制。但其缺陷也是显而易见，由于是在极为强烈的弧光下摄取焊接熔池的图像，电弧的辐射光强度远远超过焊接熔池辐射光强，并且也超过了 CCD 传感器上限，对所摄取的图像有很大的影响，图像噪声很大，经常会把熔池内部的图像信息淹没掉，因此如何在极为强烈的弧光作用下，获取包括熔

池前端焊缝比较清晰的图像，将成为跟踪系统的关键之一。在上一章中，已经介绍了通过减光-滤光系统的设计来减弱弧光对图像的影响。在本章中，介绍在不影响焊接质量条件下对焊接基值电流进行选择的方法以及调整合适的取像时刻等方法来获取较好的图像。

选择基值焊接电流的依据是，取像时刻电流大小对图像质量有很大影响。基值电流越小，电弧的影响较小，图像越清晰。接下来我们通过实验分析了如何在不影响焊接质量的前提下减少焊接基值电流，从而获取较清晰的焊接图像。同时，由于起弧状态下各种高频高压信号的影响，焊机的电流波形会受到一定的影响，所以我们对取向时刻对图像的影响也进行了一定的分析和探讨。

3.2.2 不同基值电流获得的图像对比

在本次项目中，对铝合金薄板采用脉冲 TIG 焊，在进行了各个规范的工艺参数实验后，根据焊接质量，确定峰值电流为 125A。为了同时也满足基值电流时采像的需要，我们也对使用范围内的基值电流进行了分析，在满足焊接质量的前提下，选用合适的基值电流，以下图像均为基值 50ms 时刻取得。

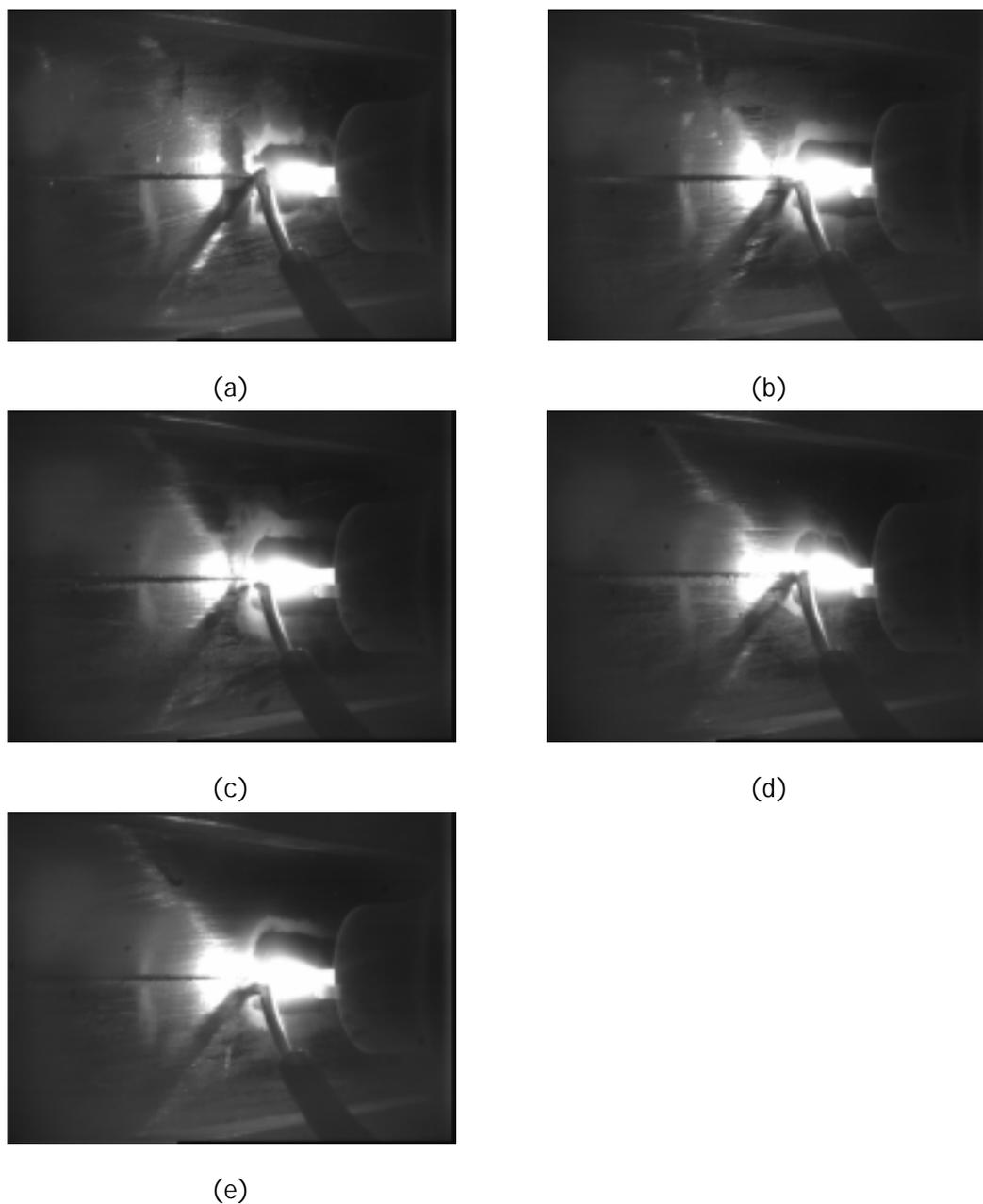


图 3-2 各基值电流下的焊接实时图像

(a)30A (b)40A (c)50A (d)60A (e)70A

Fig.3-2 Real time welding image on different base current

(a)30A (b)40A (c)50A (d)60A (e)70A

从图像可以看出，30A、40A 图像较清晰，但是在此基值下不能焊透。而相对于其他图像，基值电流为 50A 时的图像灰度对比更强烈，便于进行后续的图像处理，同时焊接质量也能够满足要求。所以在本文中，采用 50A 为脉冲基值电流。

3.2.3 不同采像时刻获得的图像对比

脉冲 TIG 焊接的一个特点就是基值电流时电弧不是特别稳定，可能发生弧飘等情况。本文中采用的脉冲频率为 2Hz，即每个周期有 250ms 处于基值阶段。由于起弧状态下各种高频高压信号的影响，焊机的电流波形会受到一定的影响。本文对取像时刻进行了初步的探讨，根据基值期间各个时刻图像的质量来确定取像时刻。

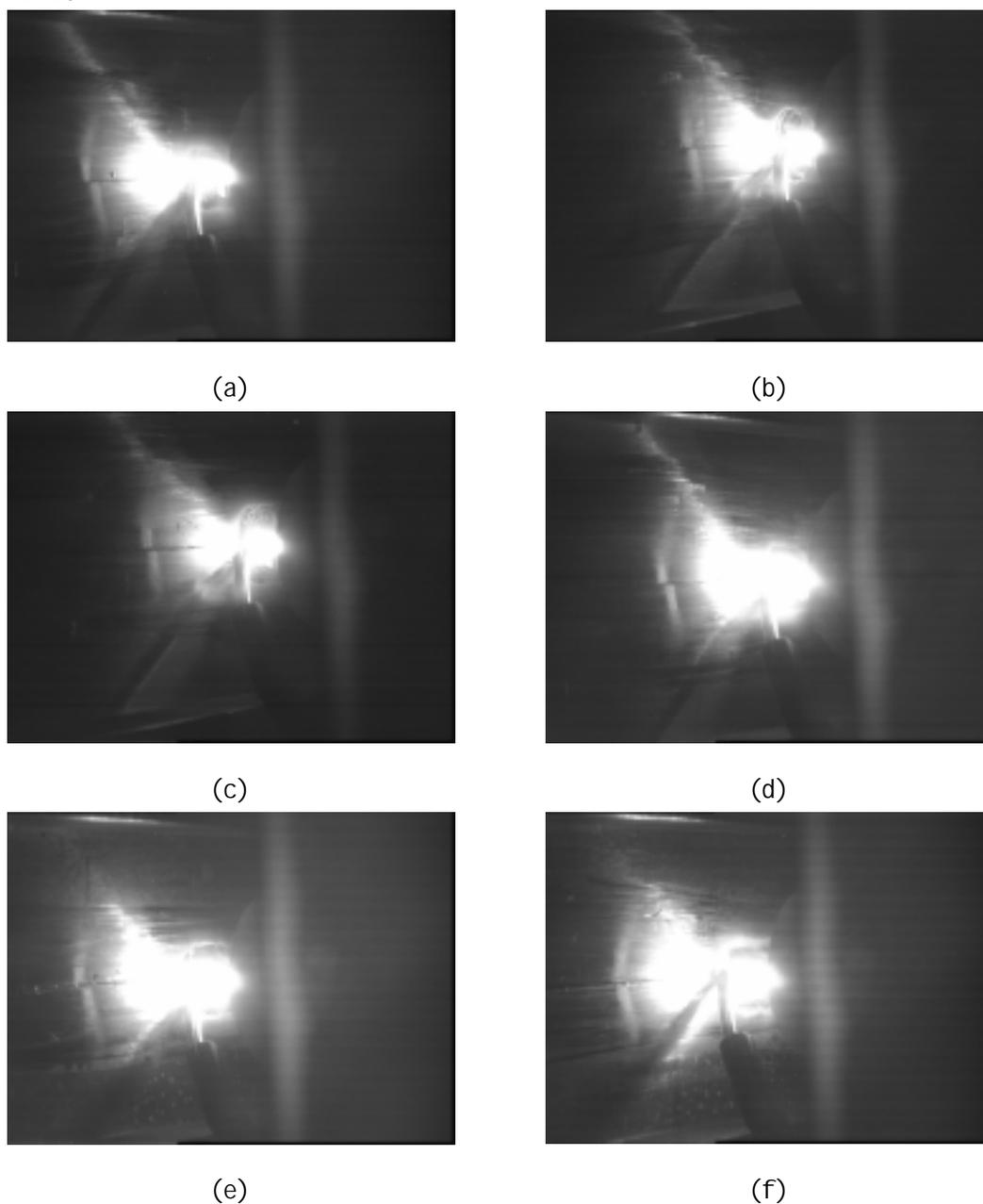


图 3-3 各取像时刻下的焊接实时图像

(a)30ms (b)40ms (c)50ms (d)60ms (e)70ms (e)80ms

Fig.3-3 Real time welding image on different time

(a)30ms (b)40ms (c)50ms (d)60ms (e)70ms (e)80ms

从图像可以看出，相对于其他图像，采像时刻为脉冲下降沿后 50ms 的图像清晰度更好，便于进行后续的图像处理，所以在本文中，采像时刻均为脉冲下降沿后 50ms。

3.3 开小窗口分析法

视觉传感器主要观察熔池附近的特征，包括焊缝间隙、熔池前端、焊缝中心等。图 3-1 是一幅铝合金脉冲 TIG 焊接图像，图像大小为 768pixel × 576pixel。从图中可以看出，只有少部分区域包含了所需要的全部信息，就不必浪费大量时间处理整幅图像。为了准确、快速的提取出所有特征信息，本文提出了“小窗口”同时获取焊缝特征信息的方法，在焊缝区域开了一个 100pixel × 120pixel 的小窗口，仅对此窗口内的图像进行处理。从图中可以看出，该窗口包含了进行焊缝跟踪所需要的特征信息，又削减了大量不必要的图像信息。

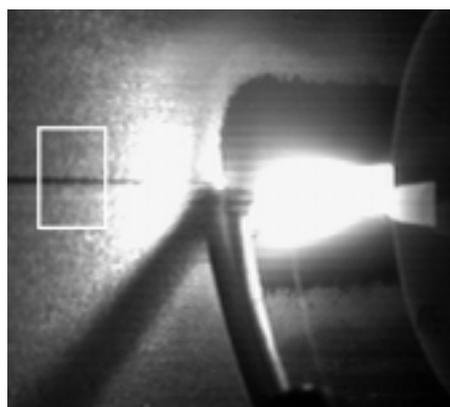


图 3-4 铝合金脉冲 TIG 焊接图像

Fig.3-4 Al alloy Tig welding real time image

前文已经介绍过 CCD 摄像机和送丝嘴都固定在焊枪上，也就是焊枪、钨极、送丝嘴在图像平面投影的相对位置是不变的，同时在实验前已经将 CCD 摄像机的轴心、焊枪轴心以及焊缝调节到了同一个平面上，如此，焊枪的轴线在图像平面上的投影基本上就是一条水平线，为后续的跟踪提供了便利条件。

3.4 图像处理算法

在弧焊过程中，由于存在弧光、电弧热、飞溅、以及烟雾等多种强烈的干扰，特别是弧光对摄取的焊缝图像影响很大，因此图像处理技术在焊缝跟踪系统中的作用十分重要，是焊缝跟踪系统的软核心。它将 CCD 视觉传感器所采集的图像

信息进行加工处理,提取焊缝的特征信息,通过一定的算法从而获得焊枪在工件表面的投影和焊缝中心线位置之间的偏差信号。图像处理技术一般包括图像预处理、图像分割、图像后处理几个过程,以获得焊缝位置的精确信息。

从图 3-4 中看到除焊缝外,图像灰度分布差别不是很大。由于焊接板材无坡口,焊缝与周边材质灰度值反差明显。根据这个特征,我们以每纵行的灰度变化速率为参考,配合一定的图像预处理算法,可以提取焊缝边缘并拟和出焊缝中心线。

3.4.1 图像复原

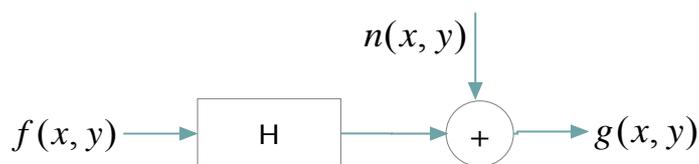
焊接图像的一个特点就是,在高频高压的环境下,图像很容易受到干扰。在本文中,我们采用了包括屏蔽线,滤波电路等方法,消除了大部分干扰信号,但是图像中不可避免仍然会有少量干扰存在,所以在图像处理算法的第一步我们首先进行了图像复原,以消除或减少图像质量的下降,恢复图像的本来面目,也称为图像恢复。

图像复原是利用图画现象的某种先验知识,消除退化现象的数学模型,再根据模型进行反向的推演运算,以恢复原来的景物图像。因而,图像复原可以理解为图像降质过程的反向过程。建立图像复原的反向过程的数学模型,就是图像复原的主要任务。经过反向过程的数学模型的运算,要想恢复全真的景物图像比较困难。所以,图像复原本身往往需要有一个质量标准,即衡量接近全真景物图像的成都,或者说,对愿图像的估计是否到达最佳的程度。

由于退化的因素众多而且性质不同,为了描述图像退化过程所建立的数学模型往往多种多样,而恢复的质量标准也往往存在差异性,因此图像复原是一个复杂的数学过程,图像复原的方法、技术也各不相同。

图像复原处理的关键问题在于建立退化模型^[57]。输入图像 $f(x, y)$ 经过某一退化系统后输出的是衣服退化的图像。为了讨论方便,把噪声引起的退化即噪声对图像的影响一般作为加性噪声考虑,这也与很多实际应用情况一直,如图像数字化时的量化噪声,随机噪声等就可以作为加性噪声。

原始图像 $f(x, y)$ 经过一个退化算子或退化系统 $H(x, y)$ 的作用,再和噪声 $n(x, y)$ 进行叠加,形成退化后的图像 $g(x, y)$ 。下列流程表示退化过程的输入和输出的关系,其中 $H(x, y)$ 概括了退化系统的物理过程,就是所要寻找的退化数学模型。



数字图像的图像恢复问题可看作是：根据退化图像 $g(x, y)$ 和退化算子 $H(x, y)$ 的形势，沿着反向过程去求解原始图像 $f(x, y)$ ，或者说是逆向寻找原始图像的最佳近似估计。图像退化的过程可以用数学表达式写成如下的形式：

$$g(x, y) = H[f(x, y) + n(x, y)]$$

在本文中，我们采用了逆滤波器方法来进行图像复原。逆滤波是最早应用与数字图像复原的一种方法，并用此方法处理过漫游者，探索者等卫星探索发射得到的图像。

把噪声考虑进去，离散图像退化模型为：

$$g_e(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m, n) h_e(x-m, y-n) + n_e(x, y) \quad (3-1)$$

$$\text{写成矩阵形式为 } g = Hf + n. \quad (3-2)$$

逆滤波法是指在对 n 没有先验知识的情况下，可以依据这样的最优准则，即寻找一个 \hat{f} 使得 $H\hat{f}$ 在最小二乘方误差的意义下最接近 g ，即要使 n 的模或者范数最小：

$$\|n\|^2 = n^T n = \|g - H\hat{f}\|^2 = (g - H\hat{f})^T (g - H\hat{f}) \quad (3-3)$$

其极小值为 $L(\hat{f}) = \|g - H\hat{f}\|^2$ ，如果在求最小值的过程中不做任何约束，称这种复原为非约束复原。由极值条件 $\frac{\partial L(\hat{f})}{\partial \hat{f}} = 0 \Rightarrow H^T (g - H\hat{f}) = 0$ 解出 \hat{f} 为

$\hat{f} = (H^T H)^{-1} H^T g = H^{-1} g$ ，对其作傅立叶变换可得

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (3-4)$$

可见，如果知道 $g(x, y)$ 和 $h(x, y)$ ，也就知道了 $G(u, v)$ 和 $H(u, v)$ 。根据式

$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)}$ 即可得到 $F(u, v)$ ，再经过反傅立叶变换就能求出 $f(x, y)$ 。

由式 $F(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)}$ 进行图像复原时，由于 $H(u,v)$ 再分母上，当 $u-v$ 平面

上的某引起点或区域 $H(u,v)$ 很小或等于 0 时，就会导致不稳定解。因此，即使没有噪声，一般也不可能精确复原 $f(x,y)$ 。如果考虑噪声项 $N(x,y)$ ，则出现零点时，噪声项将被放大，零点项的影响将会更大，这就是无约束图像复原模型的病态性质。

在本文中，为了避免 $H(u,v)$ 值太小，我们采用的方法是在 $H(u,v) = 0$ 的哪些频谱点及其附近，人为设置 $H^{-l}(u,v)$ 的值，使得在这些频谱点附近 $N(x,y)/H(u,v)$ 不会对 $\hat{f}(u,v)$ 产生太大的影响。

图 3-5 为复原前后的焊缝区图像对比

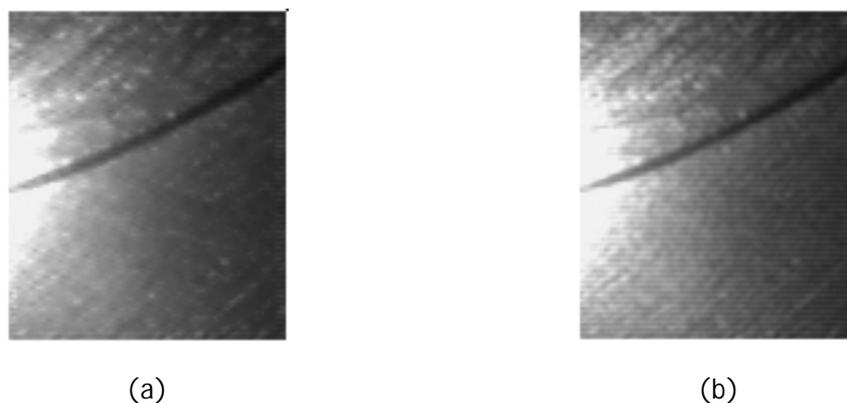


图 3-5 复原前后图像对比 (a)复原前 (b)复原后

Fig.3-5 Comparison of images before and after recovering

(a)Before recovering (b)After recovering

3.4.2 中值滤波

中值滤波是一种非线性信号处理方法，与其对应的中值滤波器也是一种非线性滤波器。它是在 1971 年由 J.w.Jukey 首先提出并应用在一维信号处理技术中，后来被而为图像信号处理技术所引用。在一定条件下，可以克服线性滤波器所带来的图像细节模糊，并且对滤除脉冲干扰及图像扫描噪声最为有效。在实际运算过程中并不需要图像的统计特性，这也带来了不少方便^[58]。

在这里本文通过对图像进行中值滤波的方法去除随机噪声。中值滤波是一种非线性信号的处理方法，在图像处理中，常用于用来保护边缘信息。不同于均值滤波等线性滤波算法。

本文选用 3×3 模板中值滤波，则当前像素点的灰度值由它的八邻域 (neighborhood) 的像素灰度值的中间值获得，假设某像素点及其八邻域像素的灰度值的升序排列为 $\{p_1, p_2, \dots, p_8, p_9\}$ ，则该点的灰度值为：

$$p_0 = p_5 \quad (3-5)$$

其中 p_5 是将八邻域内的所有九个像素点的灰度值按升序排列后的灰度中间值。

通过采用中值滤波方法可以有效的消除图像中的干扰及图像扫描噪声，并且可以克服线性滤波方法（如最小均方滤波、均值滤波等）所带来的使图像细节模糊的缺点。中值滤波结果见图 3-6。



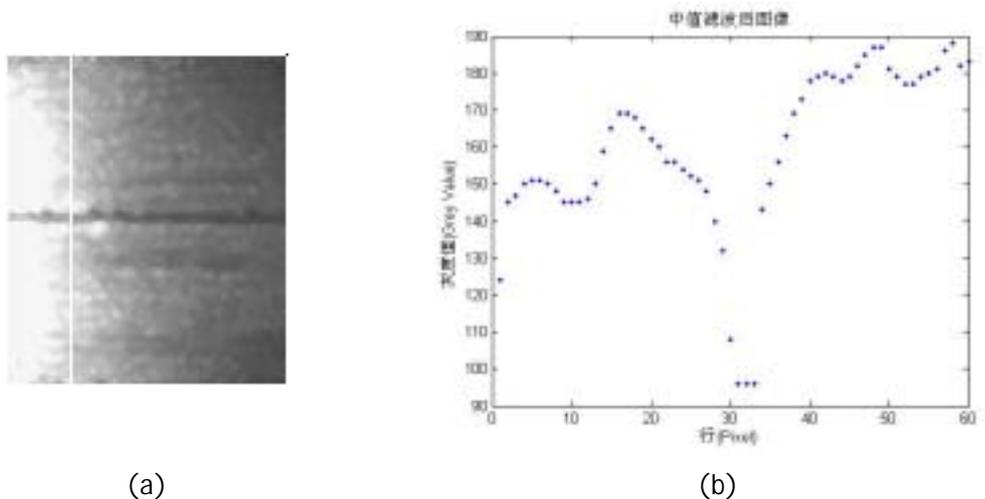
图 3-6 中值滤波前后图像对比 (a)滤波前 (b)滤波后

Fig.3-6 Comparison of images before and after mid-value filter

(a)Before mid-value filter (b)After mid-value filter

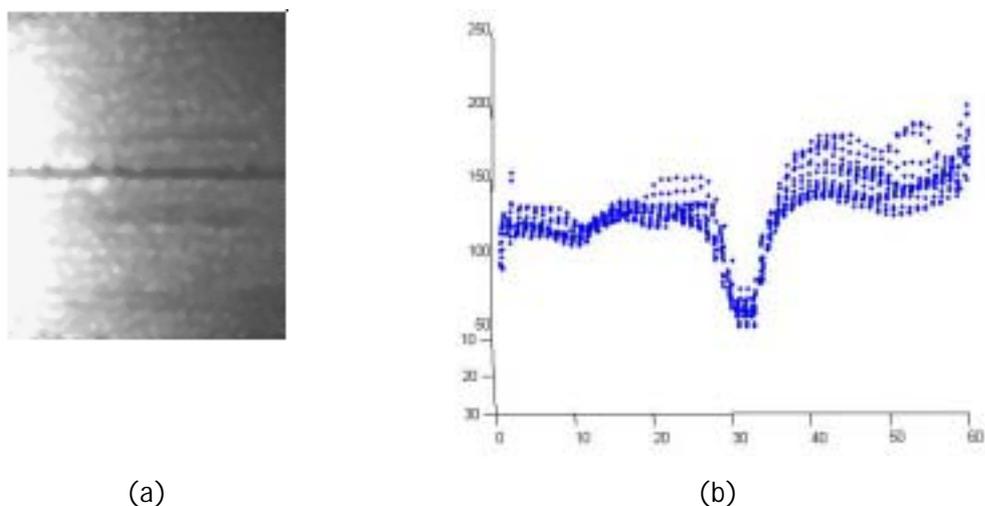
3.4.3 焊缝边缘获取

在对图像进行了观察和分析后，我们发现即焊缝边缘和其他区域相比，灰度变化极大。首先我们对纵向一系列的灰度值进行处理，得到如图 3-7(b)所示结果。



(a) (b)
 图 3-7 样本列灰度变化 (a)样本列 (b) 灰度变化
 Fig.3-7 The alteration of grey scale of specimen column
 (a)Specimen column (b) The alteration of grey scale

从而我们可以推断，小窗口的纵向一列中，相邻两个点之间灰度变化最大的点，即为焊缝边缘点。之后对整幅图像进行分析，得到如图 3-8、3-9 结果



(a) (b)
 图 3-8 整幅样本灰度变化 (a)样本图像 (b) 灰度变化
 Fig.3-8 The alteration of grey scale of whole specimen picture
 (a)Whole specimen picture (b) The alteration of grey scale

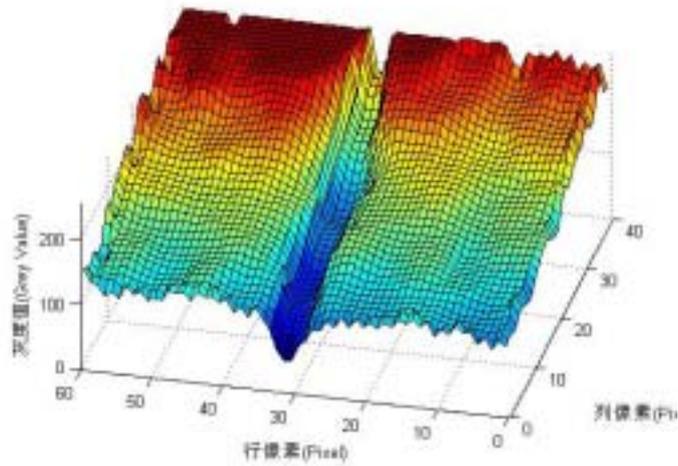
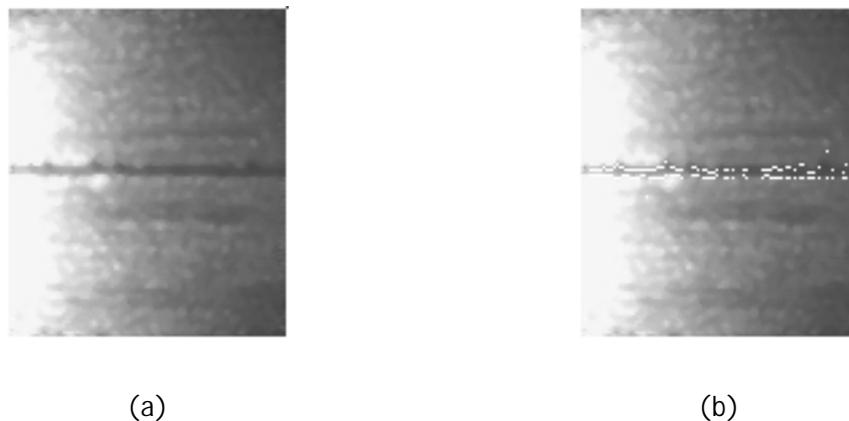


图 3-9 灰度变化三维示意图

Fig.3-9 Three-dimension graphics of grey scale alteration

因此,本文根据灰度值变化的速率来确定焊缝边缘点,即每一列中速率变化最大的两个点,即为焊缝的上下边缘点。用此种边缘检测算法是基于 2mm 薄板的特性,没有坡口使焊缝处较大的灰度变化在整幅图像中极易捕捉,同时不大的计算量也不会影响到图像处理的实时性。

边缘捕捉结果如图 3-10 所示



(a) (b)

图 3-10 边缘捕捉 (a)原图 (b)捕捉结果

Fig.3-10 Edge searching (a)original image (b)Processed image

3.4.5 去除伪边缘

经过上述图像处理之后并不能够准确的获得焊缝边缘,仍旧有伪边缘存在,如何再去除伪边缘点,识别出真正的焊缝边缘,是图像处理中最困难,也是最关键的技术。本文通过 24 邻域从上下两个方向向中间逐行扫描的方式去除伪边缘点。由于焊缝边缘是连续变化的,假设存在图像处理误差在两个像素之内,所以,定义如果某一特征点 24 邻域内不存在相邻特征点,认为该点为伪边缘点或孤立

点。可以表示为：

$$\begin{cases} \sum_{j=-2}^2 \sum_{i=-2}^2 P(x+i, y+j) = 255 & \text{边缘点} \\ \sum_{j=-2}^2 \sum_{i=-2}^2 P(x+i, y+j) < 255 & \text{伪边缘} \end{cases} \quad (3-6)$$

处理结果如图 3-11 所示。



(a)



(b)

图 3-11 去除伪边缘结果 (a)原始边缘 (b)处理后边缘

Fig.3-11 Pseudo edge elimination (a)original image (b)Processed image

3.4.6 曲线拟和

根据上面的图像处理算法，可以处理出焊缝边缘二值化图像，然后对上下边缘取平均值焊缝中心线。但是，由于焊缝边缘点不完整，我们利用最小二乘法拟合边缘曲线。

所谓最小二乘法在我们研究两个变量(x, y)之间的相互关系时，通常可以得到一系列成对的数据(x1, y1, x2, y2... xm, ym)；将这些数据描绘在 x-y 直角坐标系中，若发现这些点在一条直线附近，可以令这条直线方程如(式 3-7)：

$$y_{\text{fit}} = a_0 + a_1 x \quad (3-7)$$

其中：a₀、a₁ 是任意实数

为建立这直线方程就要确定 a₀ 和 a₁，应用最小二乘法原理，将实测值 y_i 与利用(式 3-7)计算值(y_{fit} = a₀ + a₁ x)的离差(y_i - y_{fit})的平方和 [∑(y_i - y_{fit})²] 最小为“优化判据”。

$$\text{令：} \varphi = \sum (y_i - y_{\text{fit}})^2 \quad (3-8)$$

把(式 3-7)代入(式 3-8)中得：

$$\varphi = \sum (y_i - a_0 - a_1 x)^2 \quad (3-9)$$

当∑(y_i - y_{fit})²最小时，可用函数 φ 对 a₀、a₁ 求偏导数，令这两个偏导

数等于零。

可得：

$$m a_0 + (\sum x_i) a_1 = \sum y_i \quad (3-10)$$

$$(\sum x_i) a_0 + (\sum x_i^2) a_1 = \sum (x_i y_i) \quad (3-11)$$

得到的两个关于 a_0 、 a_1 为未知数的两个方程组，解这两个方程组得出：

$$a_0 = (\sum y_i) / m - a_1 (\sum x_i) / m \quad (3-12)$$

$$a_1 = [\sum x_i y_i - (\sum x_i \sum y_i) / m] / [\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / m] \quad (3-13)$$

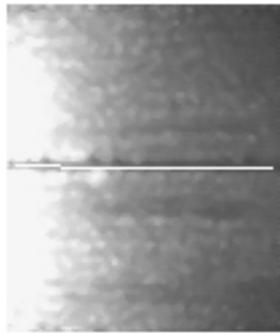
这时把 a_0 、 a_1 代入(式 3-7)中，就是我们回归的线性方程。

对法兰焊缝，我们同样可以采用以最小二乘法为基础的曲线拟合。直缝和环缝的拟合方式如(式 3-14)和(式 3-15)所示。

$$\text{平板直缝} : y = a_0 + a_1 x \quad (3-14)$$

$$\text{法兰环缝} : y = a_0 x^2 + a_1 x + a_2 \quad (3-15)$$

从图 3-12 可以看出，拟合出来的焊缝边界与实际焊缝边缘基本吻合，最多不超过两个像素值。



(a)



(b)

图 3-12 拟合结果 (a)平板直缝 (b)法兰环缝

Fig.3-12 Fitting result (a)Straight seam (b)Oval seam

3.5 图像处理流程

3.5.1 法兰环缝

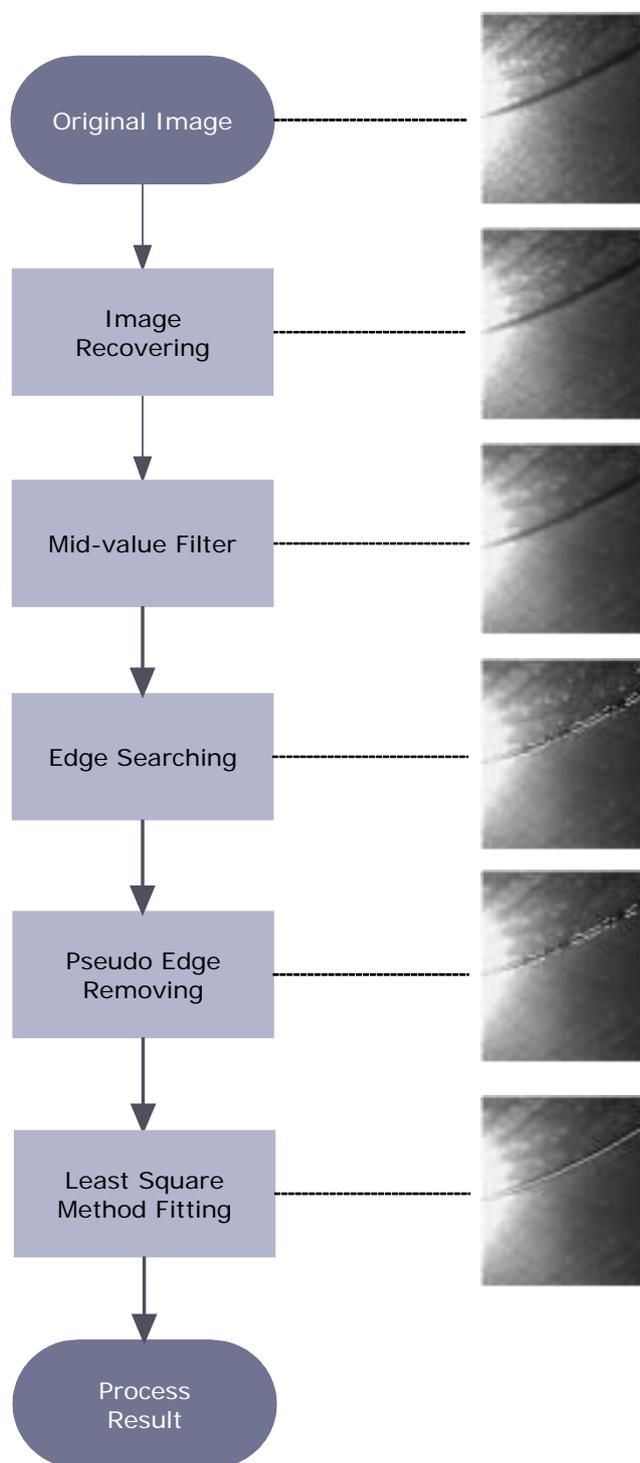


图 3-13 法兰环缝图像处理流程

Fig.3-13 Flange seam image process

3.5.2 平板直缝

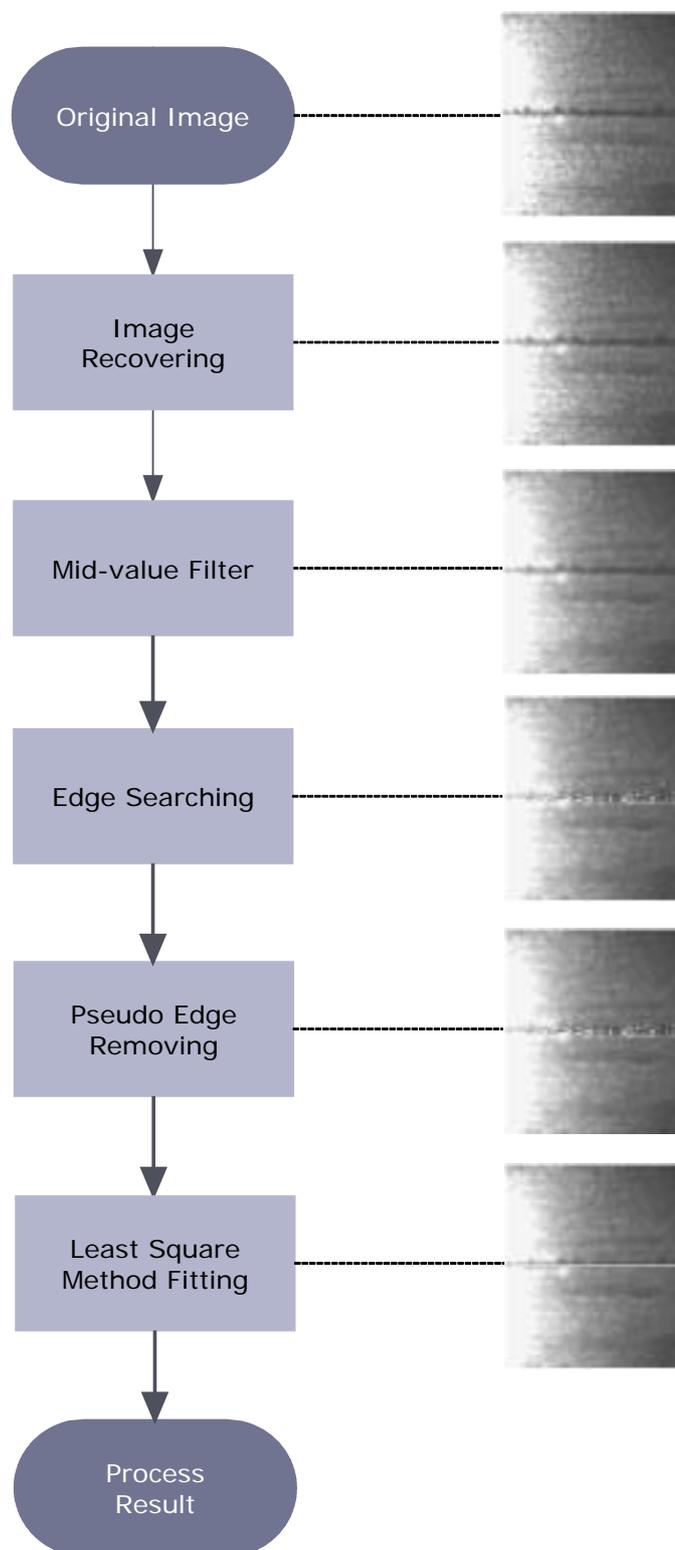


图 3-14 平板直缝图像处理流程

Fig.3-14 Straight seam image process

3.6 焊缝跟踪原理及实现

3.6.1 焊缝跟踪原理

通常研究的机器人实时焊缝跟踪技术都需要标定出机器人坐标系和图像坐标系之间的关系,这个关系的标定十分复杂,并且摄像机位置稍被移动或焦距被改变,都需要重新标定,这必将限制该技术的广泛应用。本章所提出的是一种不需要标定机器人的焊缝跟踪技术。该技术应用的前提条件是:

1. 钨极所在平面与工件坐标系平面垂直;
2. 视觉传感器固定在焊枪上, CCD 轴心基本与焊枪轴心平行;
3. CCD 轴线,焊枪轴线与焊缝切线位于同一平面。

该跟踪方法原理是固定视觉传感器在焊枪正前方,通过直接观察焊枪与焊缝中心的位置关系,提取偏差信息,输出纠偏控制电压。

由于铝合金具有较强的反光性,所以,在熔池前端区域有一个反光区,检测的间隙与实际间隙大小差异很大,甚至无法看清,所以,本次项目检测的焊缝中心距离熔池中心具有一定距离,需通过曲线拟合的方法才能计算出当前焊接位置的焊枪与焊缝中心的偏差量(图 3-15)。

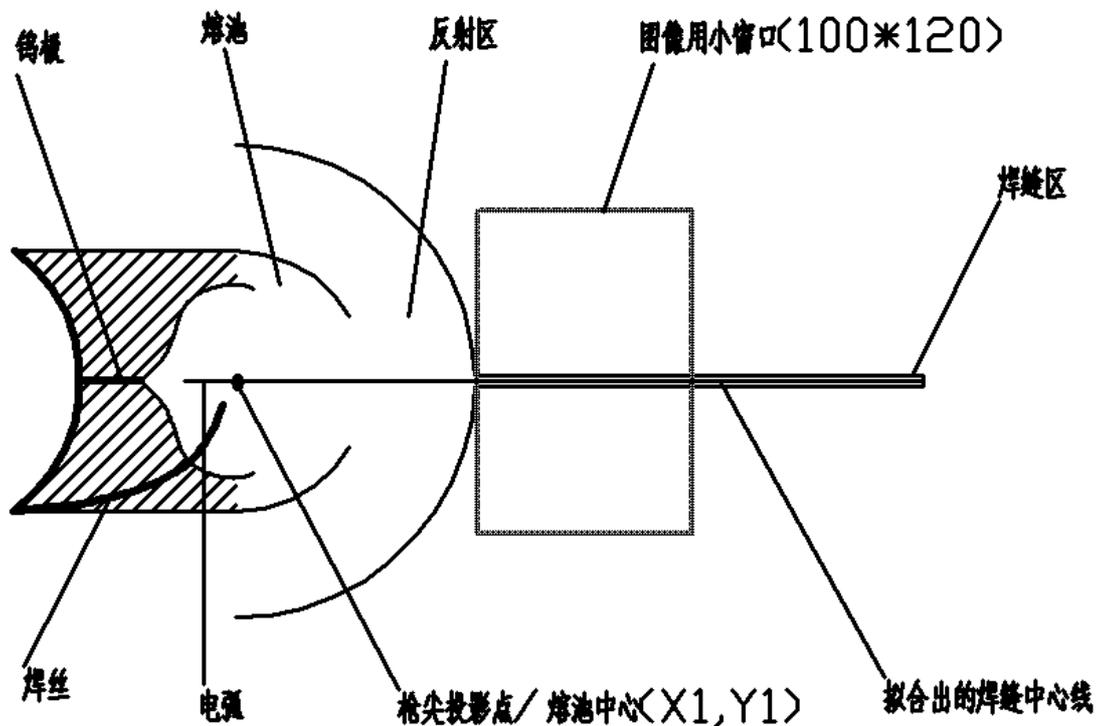


图 3-15 焊缝跟踪原理图

Fig.3-15 Seam tracking schematic diagram

3.6.2 焊缝跟踪实现

在本文中，焊缝跟踪主要通过如下几个步骤实现。

步骤 1：设定窗口左下角为坐标原点，开始焊接前预先确定枪尖投影点在图像中的坐标 $(X1, Y1)$ 。

步骤 2：通过图像处理拟合出焊缝中心线的方程 $y=f(x)$ 。

步骤 3：将枪尖投影点横坐标带入焊缝中心线方程中，求得 $Y' = f(X1)$ ，从而可以得到纠偏量 $Y = Y1 - Y'$ 。

步骤 4：通过控制器，输入量为偏差量 e ，偏差变化量 de 及偏差变化量 $\frac{\partial^2 e}{\partial t^2}$ ，输出为纠偏电压 $U_{纠}(V)$ ，完成实时焊缝纠偏。

3.7 图像处理精度验证

为了验证图像处理算法的精度，在本文中采用了激光传感器对焊缝的实际位置进行了精确定位，设备如图 3-16 所示。



图 3-16 精度验证激光测距传感器

Fig.3-16 Laser distance sensor

同时在工装一侧竖立一块表面光滑且与焊缝平行的金属板，如图 3-17 所示。



图 3-17 精度验证的参考板

Fig.3-17 Reference sheet

然后对机器人示教一条较准确的沿焊缝的路径,并在变形不大的厚板上进行实验。起弧后,激光传感器开始工作,得到实时焊缝位置,并与经过图像处理所得到焊缝位置进行对比,结果如图 3-18 所示。

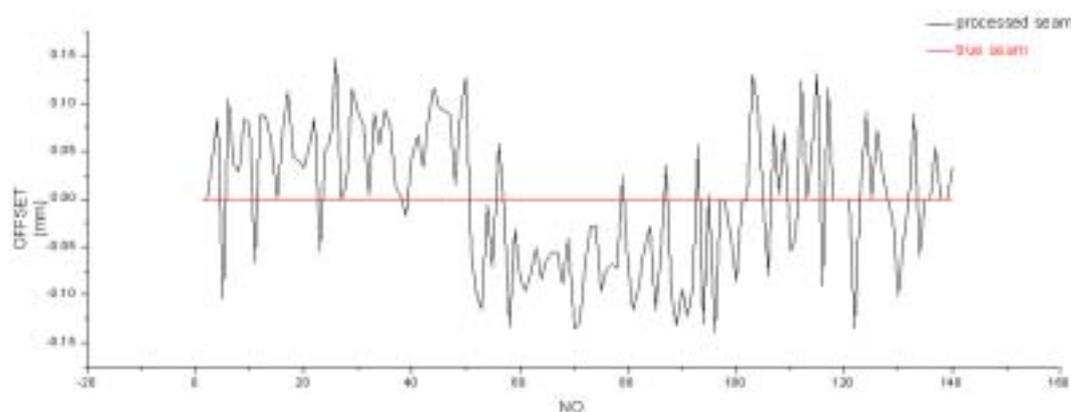


图 3-18 精度验证结果

Fig.3-18 Accuracy testing and verifying

通过对比可以看出,本文中图像处理算法所得到的焊缝位置与实际焊缝位置的误差在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内,根据前文中的标定结果,即在 2Pixel 内。

综上所述,根据试验分析和计算机数字图像处理本身固有的误差,可以确定本文研究的焊接过程的图像处理方法的精度可以控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 范围内,完全能够满足实际焊接的需求。

3.8 本章小结

本章针对铝合金薄板脉冲 TIG 焊接图像的特征进行了分析,提出了稳定可靠的图像处理算法,具体主要有以下几点:

1. 为了在图像处理前获得质量较好的焊接图像,对各个基值电流下和各个采像时刻下所获得的图像进行了分析,选取了合适的基值电流和采像时刻。

2. 图像处理算法的设计。分别对两个区域图像特征进行分析，采用图像复原、中值滤波、边缘检测、去除伪边缘和曲线拟合等方法，成功提取出焊缝边缘和焊缝中心线等特征信息。
3. 设计了一种适用于平板直缝和法兰环缝的焊缝跟踪方法。
4. 验证了本文提出的图像处理算法，精度可以控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 范围内；

第四章 模糊 PID 控制器设计

4.1 纠偏电压与纠偏量的关系建模

4.1.1 对机器人纠偏卡建模的意义

1. 在起弧状态下，由于受到各种信号干扰，纠偏电压和纠偏量关系并不如不起弧时这么简单。
2. 首钢 MOTOMAN 系列机器人纠偏卡是不开放的，即无法得知其运动细节，建模可以使该过程简单化，即



3. 对纠偏系统进行建模后，可以使用 Matlab 的 Simulink 工具对控制器进行离线设计。

4.2.2 随机电压输出与其对应的偏差量数据获取

为了更精确地探讨纠偏电压和偏差的关系，同时设计合适的 PID 控制器，我们对两者之间的关系进行了建模。经过实验，在机器人运动过程中，我们在单位时间内随机给出不同的纠偏电压，并记录了该纠偏电压下的偏差量。我们选取了连续的三组共 383 对数据作为样本空间，如图 4-1 所示。

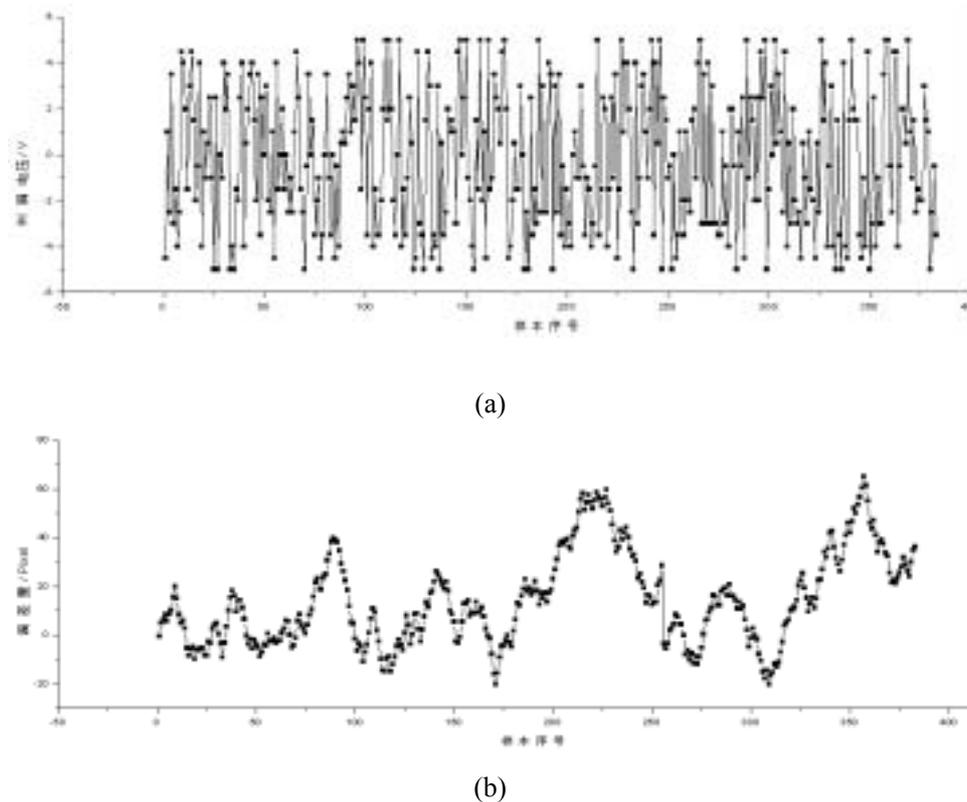


图 4-1 随机实验数据 (a)纠偏电压随机数据 (b)偏差量随机数据

Fig.4-1 Random experiment data

(a)Correct voltage random data (b)Offset data

4.3.3 利用随机数据建模结果

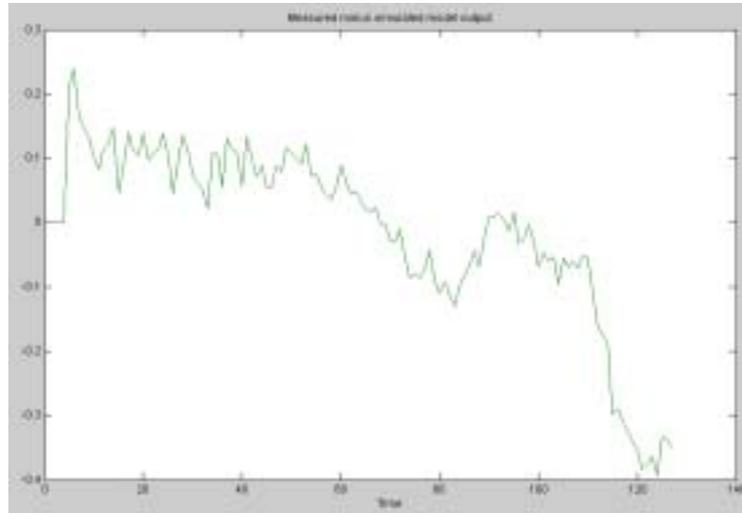
使用 Matlab 对三组数据进行建模，得到了一个线性回归模型，对三组数据都有很高的适配度。模型方程为：

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (4-1)$$

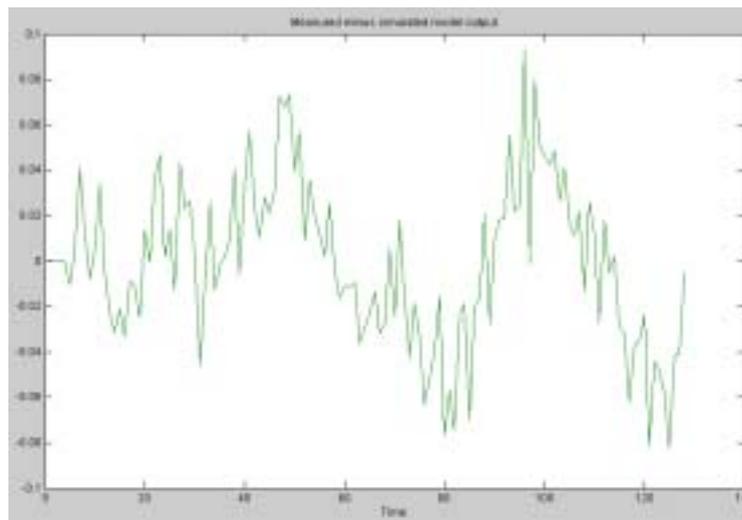
$$A(q) = 1 - 0.9973 q^{-1} \quad (4-2)$$

$$B(q) = -0.07953q^{-1} - 0.02448q^{-2} - 0.001343q^{-3} - 0.002461q^{-4} - 0.0006342q^{-5} \quad (4-3)$$

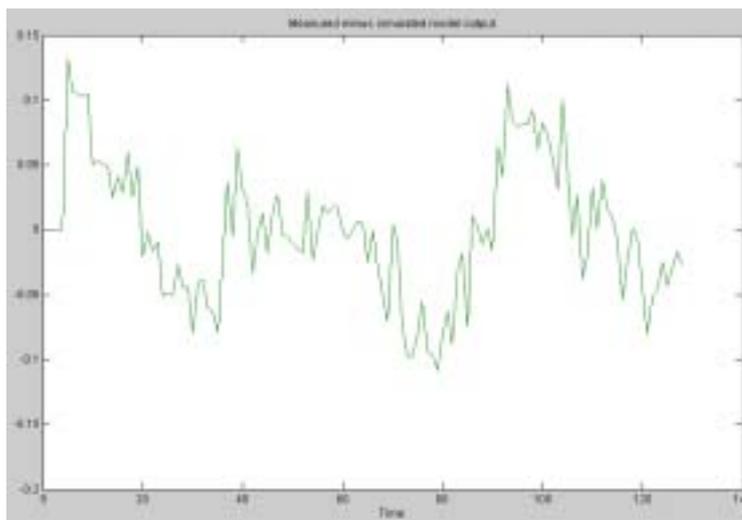
该模型对三组数据的模型误差曲线分别如图 4-2 所示。第一组数据适配度为 82.3%，第二组数据适配度为 97.16%，第三组数据适配度为 95.99%。数据表明使用该模型来模拟机器人纠偏卡工作过程是可行的。



(a)



(b)



(c)

图 4-2 三组数据对模型的适配度曲线

(a) 第一组数据适配度曲线 (b) 第二组数据适配度曲线 (c) 第三组数据适配度曲线

Fig.4-2 Fitting curve of three data groups to Model

(a) First group (b) Second group (c) Third group

根据此模型，我们在 Matlab 的 Simulink 中的对该线性回归模型进行仿真，并以此模型来进行控制器的离线设计，如图 4-3 所示。

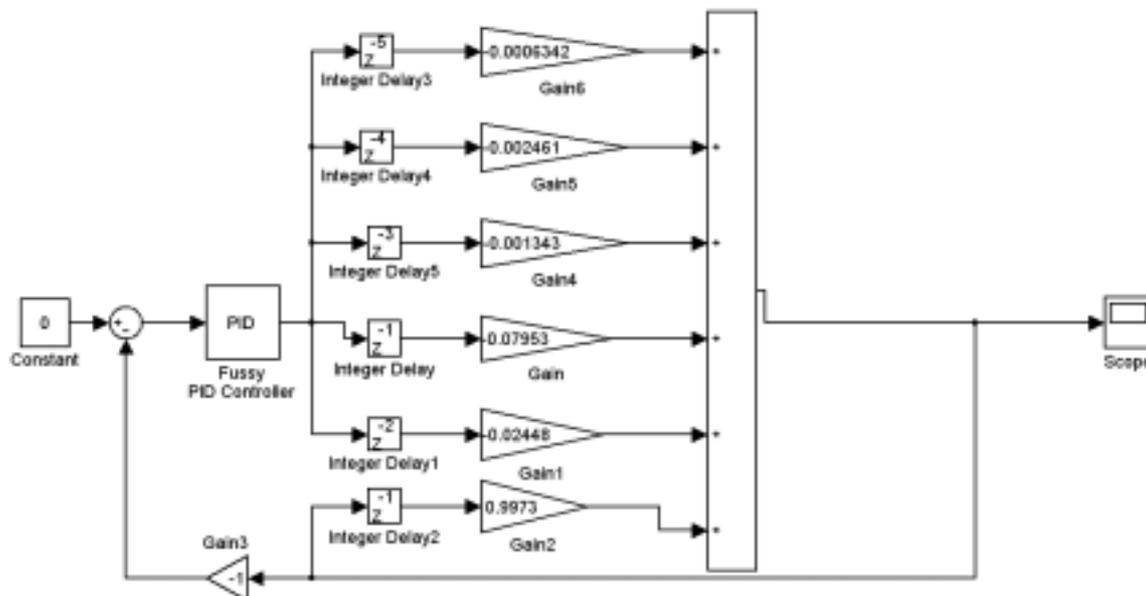


图 4-3 纠偏卡工作原理仿真

Fig.4-3 Correcting card model simulation

根据此模型，我们就可以进行了大量离线实验，极大地提高了工作效率，同时降低了实验成本。

4.2 起弧状态下纠偏量与纠偏电压关系研究

4.2.1 MOTOMAN 机器人实时纠偏运动规律

目前的工业机器人大部分运动模式都是基于位置优先的，并非速度优先。同时，由于生产商对产品技术的保密性，我们无法得知机器人在纠偏时各个关节如何运动，所以，必须通过大量试验辨识出机器人的运动规律。通过不起弧试验发现，给机器人纠偏卡一个电压信号之后，机器人末关节会沿着机器人焊接的垂直方向运动，合成的速度大小等于原设定的焊接速度大小，纠偏量可以表示为：

$$d = v_w \times \Delta t \times \sin \theta \quad (4-4)$$

式中 d 是纠偏量； v_w 是焊接速度； Δt 是纠偏时间，即纠偏电压的作用时间； θ 是纠偏合成轨迹方向与原焊接方向的夹角，从示意图 4-4 中可以看出。

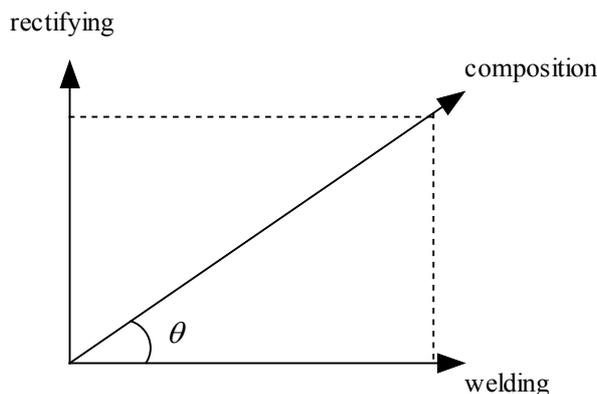


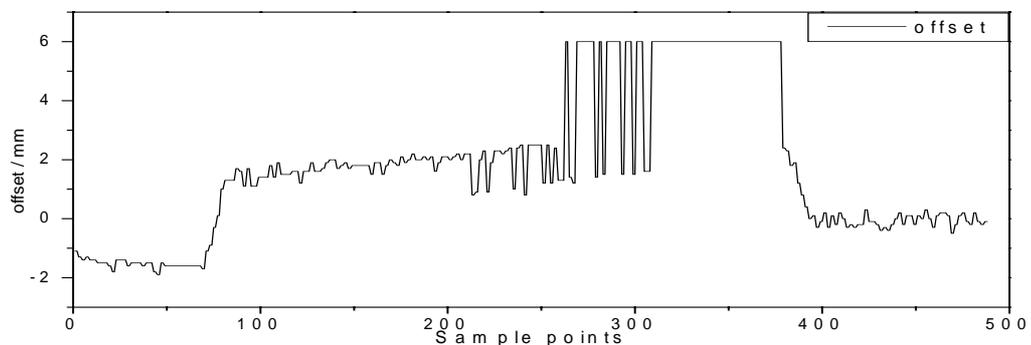
图 4-4 纠偏轨迹原理图

Fig. 4-4 Schematic diagram of rectifying trajectory

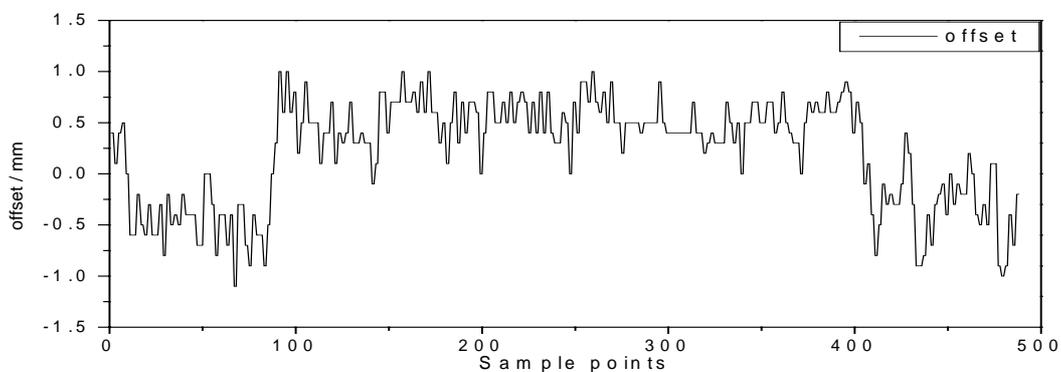
4.2.2 起弧状态下纠偏电压和纠偏量的关系

起弧状态下的实际情况要比理论上的情况复杂很多，要考虑到更多的情况，包括纠偏速度，电弧信号对纠偏卡的干扰等等。为了更好地说明问题所在，我们进行了以下的实验。

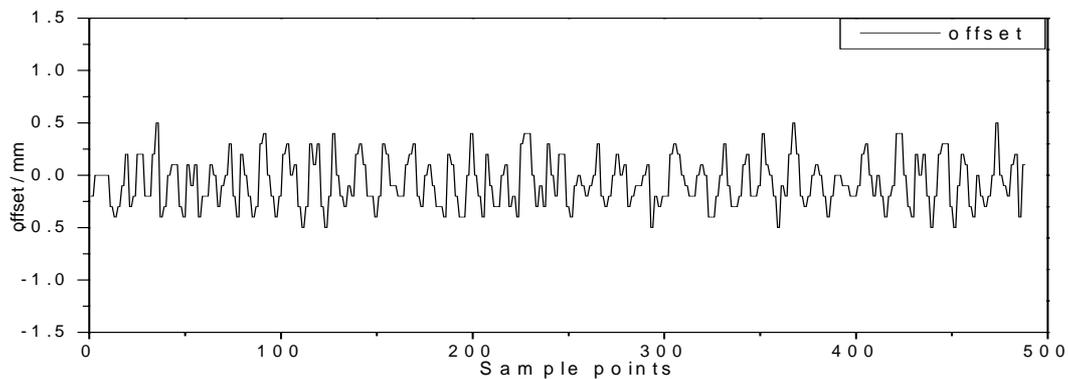
即对相同焊缝采用相同的斜线示教轨迹，从而对比不同电压得到的纠偏效果。分别用 1v、1.5v、2.5v、3v 的恒定纠偏电压信号进行纠偏。通过视觉传感器实时检测出来的焊枪与焊缝的偏差结果如图 4-5 所示。



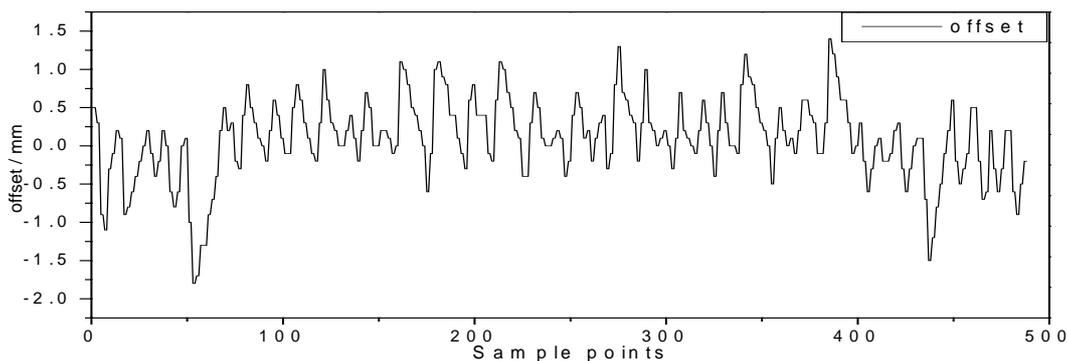
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4-5 不同纠偏电压的纠偏效果对比

(a) 1V (b) 1.5V (c) 2.5V (d) 3V

Fig.4-5 Correct effect comparison of different correct voltage

(a) 1V (b) 1.5V (c) 2.5V (d) 3V

从图 4-5 可以很清楚的看出，纠偏电压为 1v 时，由于纠偏力度太小，虽然在执行纠偏，但是偏差仍旧越来越大，甚至在末段由于偏差太大，超出可纠偏范围，图像处理程序出错，得到错误的偏差信号；当纠偏电压是 1.5v 时，可以看出其表示出来的偏差情况与图 a 分析出来的一样，两边是向下偏，中间向上偏，因此，我们也可以得出 1.5v 仍然电压偏小；当使用 2.5v 纠偏时，就看不到使用 1.5v 时的偏差特征，此时，偏差基本上在 0 附近波动；当纠偏电压达到 3v 时，可以很清晰的看出虽然依旧在 0 偏差附近波动，但是波动的幅值明显增大，实际上焊枪在焊缝附近产生了较大的振荡，必将导致较差的焊缝成形。

4.3 模糊 PID 控制器设计

4.3.1 模糊控制器原理

模糊控制是以模糊集合理论为基础的一种新兴的控制手段。它是模糊系统理论和模糊技术与自动控制技术相结合的产物。它是用语言归纳操作人员的控制策略。运用语言变量和模糊集合理论形成控制算法的一种控制首次用模糊逻辑和模糊推理实现了第一台试验性的蒸汽机控制开始了模糊控制在工业中的应用。随着计算机技术的不断发展，模糊理论在控制领域取得了巨大的成功，从而使得模糊控制理论成为模糊理论最广泛，最成熟的应用分支。现在，许多公司和生产厂家都能生产定型的模糊控制器，提供各种型号和功能的模糊控制芯片，大大地促进了模糊控制技术的广泛应用。

4.3.2 焊缝跟踪模糊控制器的设计原理^[69]

模糊控制器的设计就是根据实际的控制问题,设计出适合于被控过程的控制器,达到预定目标。模糊控制不需要建立控制对象精确的数学模型,只要求把现场操作人员的经验和数据总结成较完善的语言控制规则,因此它能绕过对象的不确定性“噪声以及非线性”时滞等影响。模糊控制器的基本结构如图 4-5 所示。在确定模糊控制器使用方式后即可确定模糊控制器的参数,其具体步骤如下:

1. 精确量的模糊化。选定模糊控制器的输入变量(一般是系统的误差及误差变化率)和输出变量(调节量的变化量),通过调节量变化的调整,使系统偏差减少。根据选定的输入、输出变量的语言值域(即模糊取值)及其相应的隶属函数,将精确量进行模糊化。

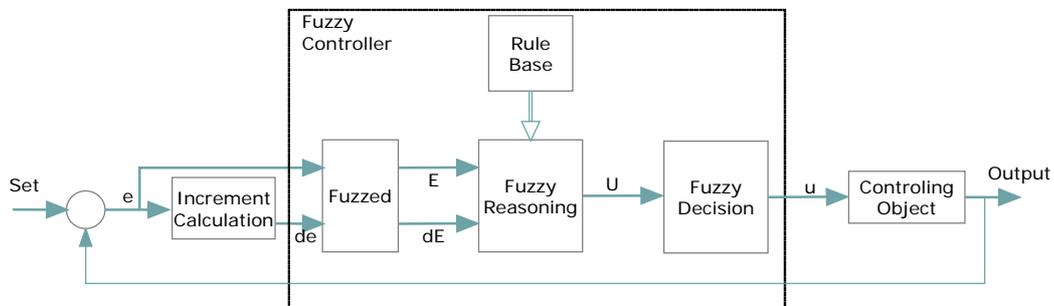


图 4-5 模糊控制器基本结构图

Fig.4-5 Fuzzy controller structure

2. 模糊推理。按总结的语言规则(在图 4-5 的规则库中)进行模糊推理,常见的模糊推理方法有最大最小推理和最大乘积推理两种,应根据具体情况选定其一。

3. 去模糊化。即把推理的结果从模糊量转化成可以用于实际控制的精确量。常见的去模糊化方法有面积重心法和平均最大值法两种。在具备很好的计算能力且时间要求不苛刻的情况下,可采用面积重心法)而在时间要求苛刻的情况下,采用平均最大值法进行去模糊化,得到控制查询表进行控制。

4. 模糊控制器的实现。模糊控制器的实现有硬件实现和软件实现两种,其中软件实现又分为离散式实现和连续式实现两种。对于存储量和计算时间要求高的系统采用离散式实现,即将输入量离散,针对每一组输入量计算其输出,制成查询表进行控制。对于精度要求高,通用性强的系统则采用连续式实现,即“在线”计算相应于输入量的输出量。

5. 优化模糊控制器。在系统运行后,根据其控制性能优化模糊控制器。通常作为优化手段可调整控制规则或比例因子,调整隶属函数的位置和形式有时也有效果。

4.3.3 基于 TIG 焊缝跟踪的模糊 PID 设计思路

根据前人所采用的 PID 控制器和焊缝跟踪控制的特点,我们设计了参数模糊自整定 PID 控制器。其实现思想是先找出 PID 3 个参数与偏差 e 和偏差变化率 e_c 之间的模糊关系,实际运行中通过不断计算 e 和 e_c ,并根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改,以此来满足当 e 和 e_c 不同情况时对控制参数的不同要求,从而使被控对象具有良好的动、静态性能,而且计算量小,易于在线实现。

在 e 和 e_c 不同情况下,被控过程对参数 K_p , K_i 和 K_d 的自整定要求可简单地总结出以下规律。

- (1) 当 $|e|$ 较大时,应取较大的 K_p 和较小的 K_d (以使系统响应加快),且使 $K_i = 0$ 为避免较大的超调,故去掉积分作用。
- (2) 当 $|e|$ 中等时,应取较小的 K_p (使系统响应具有较小的超调),适当的 K_i 和 K_d (特别是 K_p 的取值对系统的响应影响较大)。
- (3) 当 $|e|$ 较小时,应取较大的 K_p 和 K_i (以使系统具有较好的稳态特性), K_d 的取值要恰当,以避免在平衡点附近出现振荡。

通过 4.2 节中的实验可以得知,纠偏电压过大,会在一个控制周期内产生较大偏移量,有可能从正向偏差调整成负向偏差,如此会造成较大抖动影响焊接质量;纠偏电压过小,会发生不足以调整偏移量的问题。因此,纠偏电压要选择适中,既要达到稳定焊接,又要快速纠偏。

因此,为了既保证稳定焊接,又能快速纠偏,在本文中设计了模糊 PID 控制器。该控制器的思想是,在不同的环境下,调整 PID 三个参数的值,使纠偏系统满足下列要求:

1. 在偏差量较小时,进行精细调节,以防止超调和保持系统稳定为主要目标。其响应函数曲线如图 4-6 所示。

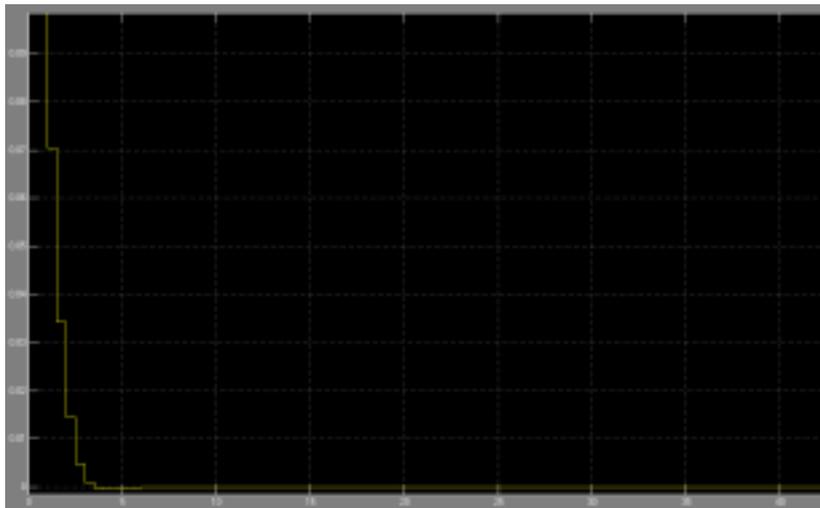


图 4-6 偏差量较小时 PID 参数的响应函数

Fig.4-6 Response function of PID parameters for small offset

2. 在偏差量较大时, 进行大步长纠偏, 使钨极尽快回到正常范围附近, 响应时间越短越好。其响应函数曲线如图 4-7 所示。



图 4-7 偏差量较大时 PID 参数的响应函数

Fig.4-7 Response function of PID parameters for big offset

在本次项目中, 我们通过大量试验数据分析其中规律, 利用模糊控制方法调整纠偏电压。模糊规则描述为:

R1: if e is A and e_c is B then K_p is C and K_i is D and K_d is E;

输入量为偏差量 e 和偏差量变化 e_c , 输出量为 PID 的三个参数 K_p , K_i 和 K_d 。

4.3.4 模糊 PID 控制器性能的改进

根据控制系统的稳定性和准确性原则, 为了提高控制器的稳定性和抗干扰性, 在本文中我们还引入了一个误差预测, 即 $\frac{\partial^2 e}{\partial t^2}$ 作为第三输入量, 将该模糊 PID 控制器改进为三输入三输出的控制器, 其系统原理图如图 4-8 所示。

对于模糊规则表, 我们分为在 $\frac{\partial^2 e}{\partial t^2}$ 基础上分为两部分来建立。一部分为

$\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \geq 0$ 时, 另一部分为 $\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} < 0$ 时。

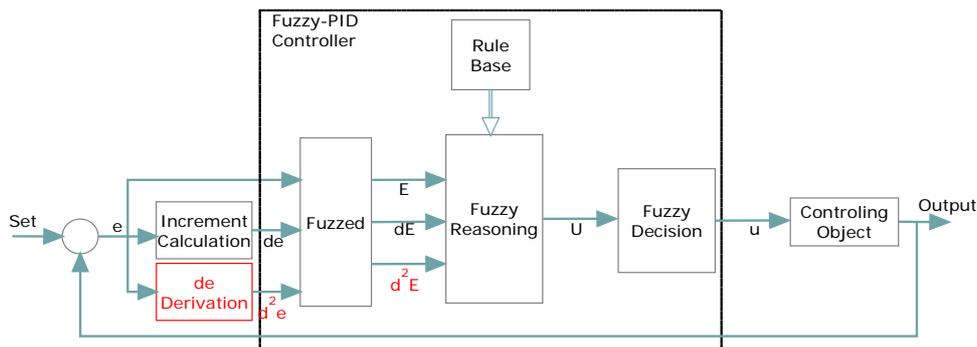


图 4-8 改进后的模糊 PID 控制器基本结构图

Fig.4-8 Advanced fuzzy controller structure

4.3.5 模糊 PID 控制查询表

根据控制器仿真与大量实际实验，我们建立如下的模糊 PID 控制查询表 (Kp/Ki /Kd)。

$$\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \geq 0 \text{ 时}$$

E \ E	-2	-1	-0.2	0.2	1	2
1	9/0/0.01	5/0.001/0.03	0	0	12/0.001/0.03	15/0/0.01
0.5	10/0/0.01	6/0.001/0.03	0	0	8/0.001/0.03	12/0/0.01
-0.2-0.2	10/0/0.01	5/0.001/0.03	0	0	5/0.001/0.03	10/0/0.01
-0.5	12/0/0.01	8/0.001/0.03	0	0	6/0.001/0.03	10/0/0.01
-1	15/0/0.01	12/0.001/0.03	0	0	5/0.001/0.03	9/0/0.01

$$\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} < 0 \text{ 时}$$

E \ E	-2	-1	-0.2	0.2	1	2
1	10/0/0.01	4/0.001/0.03	0	0	11/0.001/0.03	16/0/0.01
0.5	11/0/0.01	5/0.001/0.03	0	0	7/0.001/0.03	13/0/0.01
-0.2-0.2	11/0/0.01	4/0.001/0.03	0	0	4/0.001/0.03	11/0/0.01
-0.5	13/0/0.01	7/0.001/0.03	0	0	7/0.001/0.03	11/0/0.01
-1	16/0/0.01	11/0.001/0.03	0	0	6/0.001/0.03	10/0/0.01

4.4 焊缝跟踪系统软件设计

本文的焊缝跟踪技术可以用图 4-9 表示出来：

- (1) . 在正常焊接过程中检测脉冲下降沿信号，在检测到后开始采集图像；
- (2) . 对采集到的图像开小窗口后进行图像处理，计算出实时的偏差量，偏差变化量及偏差变化趋势。
- (3) . 将(2) 中得到的三个参数作为输入量输入模糊 PID 控制器，得到输出量，即纠偏电压。

综上所述，我们将该软件设计为三个线程。

第一个线程即为焊接主线程，包括图像卡、数据卡初始化，图像在线显示等功能。

第二个线程为图像处理和纠偏线程，在检测到脉冲下降沿信号后延时 50ms 进行图像处理，并计算出偏差量。得到偏差量之后，作为输入量输入模糊 PID 控制器中，得到纠偏电压，再通过工控机将该电压输出给机器人，进行纠偏。

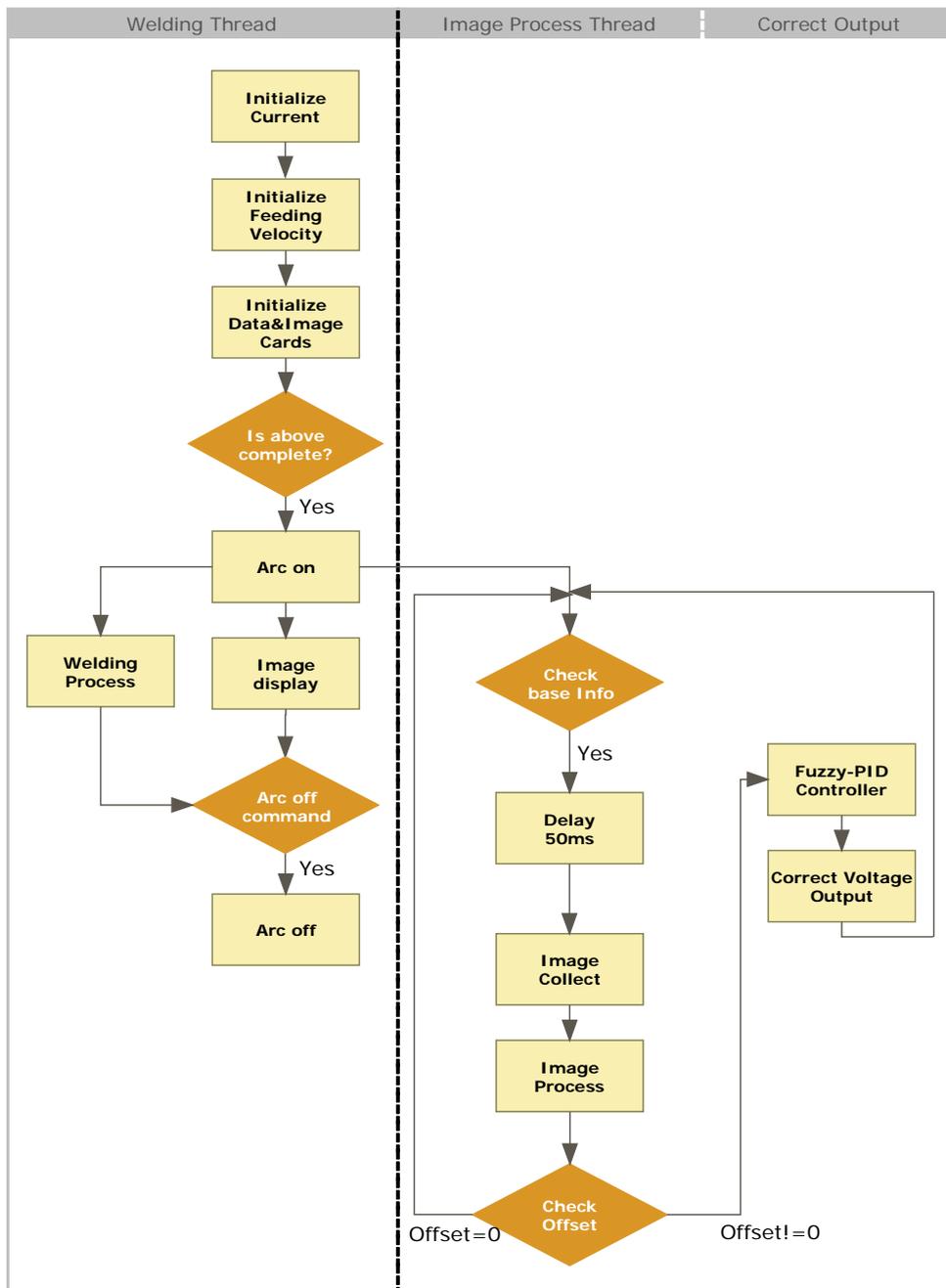


图 4-9 焊缝跟踪软件流程图

Fig.4-9 Seam tracking software flow process

4.5 本章小节

本章针对 MOTOMAN HP6 机器人的纠偏控制器设计，分析了其纠偏卡的工作原理，得到以下结论：

1. 对机器人纠偏卡的工作方式进行了随机实验，并建立了模型。除了能够更准确地了解纠偏卡的工作原理，也大大提高了控制器设计的工作效率，减小了

实验成本。

2. 为了保证焊缝纠偏的实时性和准确性，建立了以偏差 e ， Δe 和 $\frac{\partial^2 e}{\partial t^2}$ 为输入量，PID 的三个参数 k_p ， k_i 和 k_d 为输出的模糊 PID 控制器，控制机器人纠偏电压。
3. 设计和编写了一套基于图像处理和模糊 PID 控制器的焊缝跟踪软件。

第五章 实验结果及分析

5.1 引言

本章主要对弧焊机器人实时焊缝跟踪技术在平板对接试件和法兰盘试件试验的实验结果进行分析。

5.2 实验设备和条件

在第二章已经详细叙述了本文的硬件设备,下面针对焊接试验所需设备加以说明和补充。在平板实验中使用的焊接工装共有两个:

- (1). 平板工艺试验使用的操作台,如图 5-1 所示。带有不锈钢焊接衬垫,具体的结构尺寸如表 5-1 中所示。
- (2). 法兰环缝焊接工装,图 5-2 是焊接法兰环缝试件使用的工装,法兰盘外径为 $\Phi 148\text{mm}$,该工装严格按照法兰试板规格设计,焊接衬垫为距离焊缝左右分别 10mm 的环形衬垫。



图 5-1 平板焊接试验工装

Fig. 5-1 Experiment device for plate



图 5-2 法兰环缝焊接试验工装

Fig. 5-2 Experiment device for flange

表 5-1 焊接衬垫

Table 5-1 Backing bar

参数	值
材料	1Cr18Ni9Ti
尺寸	9mm×1.5mm

本文采用的焊接工艺是脉冲 TIG 焊接,具体焊接条件见表 5-2 所示。

表 5-2 试验焊接参数

Table 5-2 Welding parameters of the experiment

参数	值
焊接方式	脉冲 TIG
频率	2Hz
材料	2mm 厚无坡口 LF6 铝合金
基值电流	50A
峰值电流	125A
焊接速度	2.6 mm·s ⁻¹
保护气体	Ar

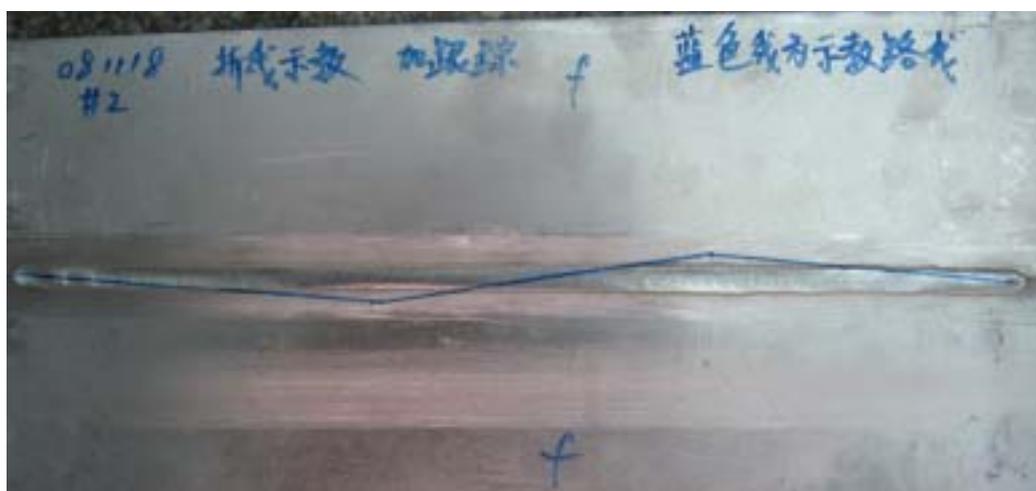
5.3 焊缝跟踪系统实验结果

在第三章和第四章介绍了实时焊缝跟踪技术的原理和实现。下面通过实验检验该跟踪系统程序在实际状态下的精度，并验证其可靠性。

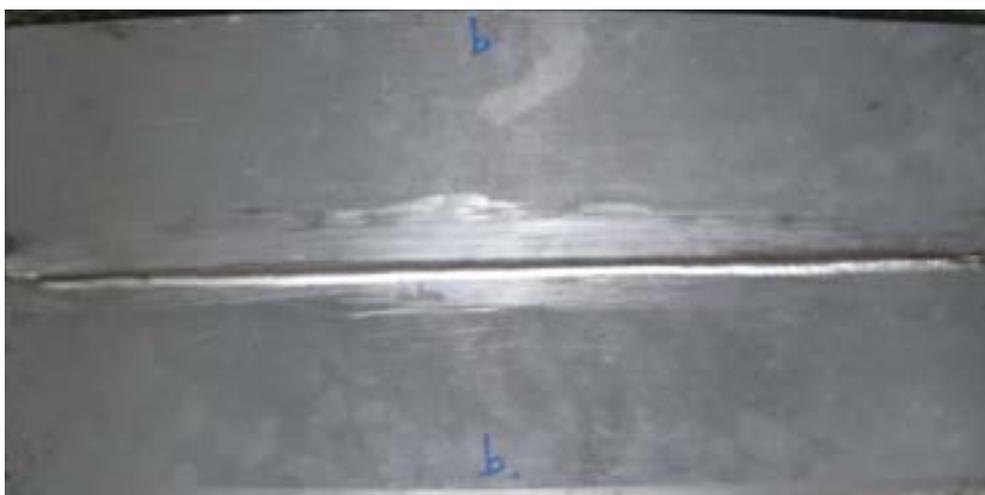
5.3.1 平板直缝跟踪实验结果

本文设计了如图 5-3(a), 5-5(a)中蓝色记号笔所示形状的斜线和折线两种示教轨迹，两块无坡口平板对接，基本上没有焊缝间隙，示教轨迹与真实焊缝的偏差量控制在 $\pm 6\text{mm}$ 范围内。

试验结果 5-3(a), 5-5(a)所示，蓝线即为无跟踪时的焊枪运动路线，实际焊接路线也可以在图中明显观察到。同时，我们也将焊缝背面进行了拍照，以作参考，如图 5-3(b), 5-5(b)所示。



(a)



(b)

图 5-3 平板直缝跟踪实验一 (a)正面 (b)背面

Fig. 5-3 Straight seam tracking experiment No.1 (a)face (b)back

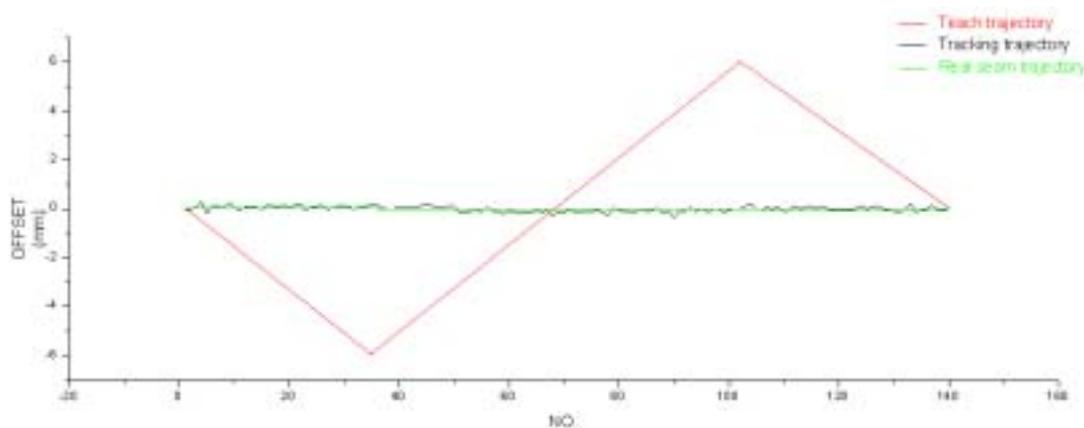


图 5-4 平板直缝跟踪实验一跟踪控制结果分析

Fig. 5-4 Data analysis of straight seam tracking experiment No.1



(a)



(b)

图 5-5 平板直缝跟踪实验二 (a)正面 (b)背面

Fig. 5-5 Straight seam tracking experiment No.2 (a)face (b)back

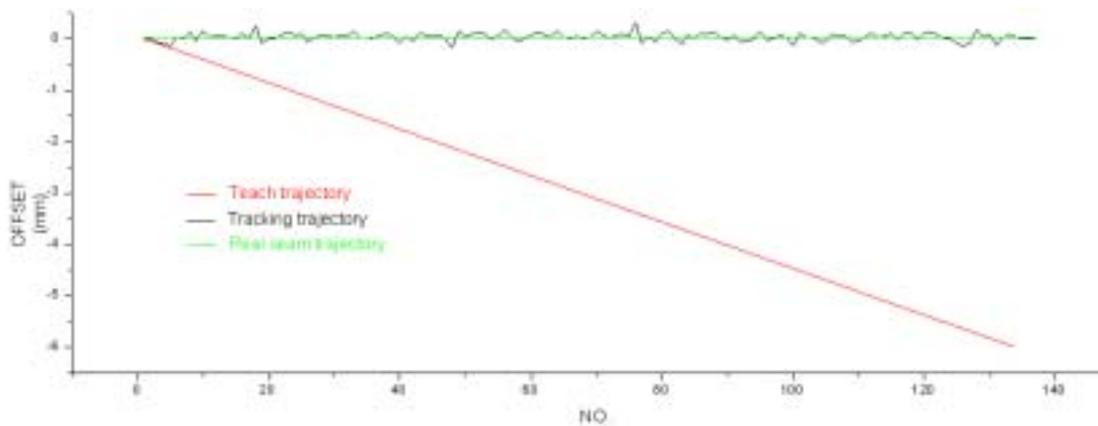


图 5-6 平板直缝跟踪实验二跟踪控制结果分析

Fig. 5-4 Data analysis of straight seam tracking experiment No.2

从上面的实验结果分析（图 5-4，图 5-6）上，可以看出跟踪控制效果非常明显，尽管示教轨迹与焊缝中心有最大 6mm 的焊缝偏差，但是通过焊缝自动跟踪系统的纠偏调节，使枪尖投影点与焊缝中心的偏差能够控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 范围内。考虑到图像处理的误差，实际跟踪误差在 $\pm 0.3\text{mm}$ 内。

5.3.2 法兰环缝跟踪试验

本节验证了法兰试验件焊接过程中焊缝跟踪控制技术的有效性。图 5-7 是对接法兰盘试验件实物照片，法兰盘直径为 $\Phi 148\text{mm}$ 。



图 5-7 实验中使用的法兰及工装

Fig.5-7 Flange and welding device used in experiment

使用机器人焊接法兰的焊缝误差来源主要有两个：一是示教机器人走圆弧轨迹是通过直线插补的方式进行的，其间存在着固有的误差，所以，本试验的示教轨迹的误差基本上在 $\pm(1 \sim 1.5)$ mm 范围内。同时，示教点个数对精度也有很大影响，在实际操作中，为了使示教轨迹精度高，要花费很多时间进行示教。二是在实际焊接过程中，由于热变形的原因，法兰会向先焊接的一侧收缩，使焊缝变宽，造成焊缝中心位置的偏移，导致焊缝烧穿（图 5-8）。由于间隙和位置偏移的存在，偏移量最大可以达到 2mm 以上。



路径偏差导致的焊接缺陷

图 5-8 未焊透法兰试板

Fig.5-8 Test plate flange with defect

为了验证法兰跟踪的有效性,本文中对机器人进行了法兰的简易示教,即一圈只示教 6 - 8 个点,随后进行跟踪实验,同时对实验中所采集到焊缝偏差量数据进行了记录。图 5-9 为实验结果。



(a)



(b)

图 5-9 平板法兰环缝跟踪实验 (a)正面 (b)背面

Fig. 5-9 Flange round seam tracking experiment (a)face (b)back

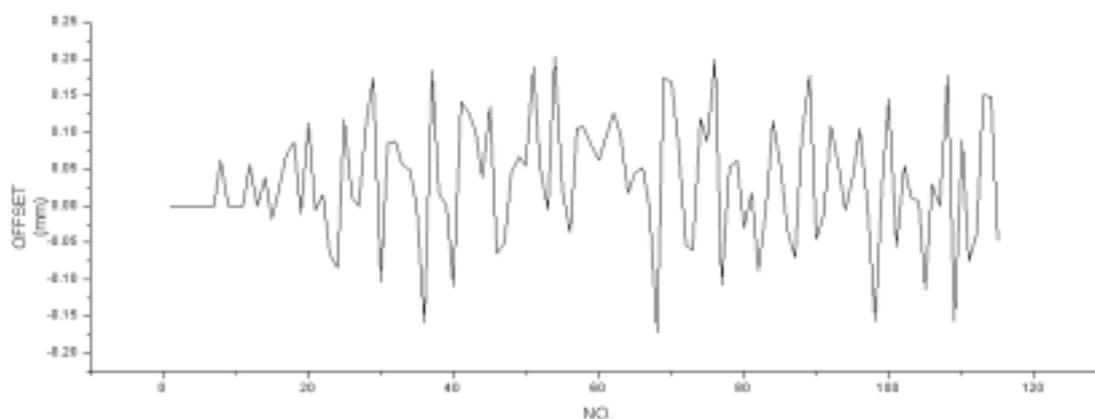


图 5-10 平板法兰环缝跟踪实验结果分析

Fig. 5-10 Data analysis of flange round seam tracking

从上面的实验结果数据分析(图 5-10)以及与相同示教条件下未跟踪试验件的对比(图 5-8),可以看出跟踪控制效果非常明显。从结果中分析出其跟踪误差略大于平板焊接,最大误差达到了 $\pm 0.2\text{mm}$ 。考虑到图像处理误差,真实误差在 $\pm 0.35\text{mm}$ 内。

5.4 本章小节

本章通过对平板对接试件和法兰试件进行了实验,验证了本文提出的弧焊机器人实时焊缝跟踪技术,具体包括:

1. 本文提出的视觉实时焊缝跟踪技术可以在线实时跟踪直线焊缝,跟踪最大误差为 $\pm 0.3\text{mm}$ 。
2. 本文提出的视觉实时焊缝跟踪技术可以在线实时跟踪曲线焊缝,跟踪最大误差为 $\pm 0.35\text{mm}$ 。

第六章 结论与展望

6.1 结论

目前,在生产中服役的焊接机器人大多是“示教-再现”型机器人,该类型机器人在弧焊过程中,不具备自适应调整焊接路线的功能,焊接工件的热变形会导致焊接过程中焊枪和焊缝中心不对中,在采用机器人路径规划或“示教-再现”模式焊接时,常会出现较大偏差。

因此,本文以弧焊机器人在脉冲 TIG 焊接过程中应用的需求为研究背景,以被动视觉作为传感方式,研究了实时焊缝跟踪和焊缝成形控制等技术,并且在生产中得到验证,具有非常重要的现实意义。

下面总结一下本文研究得到的几点结论:

1. 设计集成了弧焊机器人系统,开发了系统控制软件。利用自行编制的多线程控制软件及所设计的视觉传感器等硬件,将原有的“示教-再现”型机器人成功改造成具有视觉功能的、能够实时自动焊缝跟踪的焊接机器人系统。

2. 分析了铝合金脉冲 TIG 焊接过程的光谱特征,设计了适用于该种材料的减光-滤光系统,能够清晰的观察到了熔池前端焊缝,并设计了相应的图像处理算法,经验证,其精度能达到 $\pm 0.15\text{mm}$ 。

3. 基于 MOTOMAN 机器人纠偏卡不开放的特性,对其纠偏电压和纠偏量的关系进行了随机实验,并建立模型,使我们能够离线进行控制器设计和调节,大大提高了实验效率。

4. 提出了一种基于视觉的实时焊缝跟踪方法,该方法免于标定机器人可实时焊缝跟踪。在保证焊接过程稳定的前提下研究了焊缝跟踪算法,建立了适合焊接过程的模糊 PID 实时焊缝跟踪控制器。经过试验验证:LF6 铝合金在线实时跟踪直线焊缝和曲线焊缝,跟踪最大偏差分别可以控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 和 $\pm 0.35\text{mm}$ 以内。

6.2 研究展望

本论文的研究主要基于实际焊接生产的应用,论文提出的机器人实时焊缝跟踪控制需要根据实际焊接环境的变化不断完善。从系统的角度综合考虑,可以在以下方面做出进一步的研究工作:

1. 机器人焊接高度方向实时焊缝跟踪。在焊接过程中,焊接高度对焊接质量具有较大的影响。本文是通过机器人的示教功能保证的焊接高度基本不变,但

从工程应用角度,也需要实时纠偏焊接高度,可以从视觉或其他传感方式进行研究。

2. 图像处理算法适应性扩展。在第三章提出的图像处理方法适合于 LF6 铝合金薄板焊接基值电流在 30A - 70A 范围内变化,下一步工作可以进一步改进图像处理算法和图像采集方法,使得视觉技术可以应用在更宽范围的焊接电流条件下。

参考文献

- [1] 林尚扬, 陈善本, 李成桐编著, 焊接机器人及其应用, 北京, 机械工业出版社, 2000 年
- [2] 刘桑。药芯焊丝水下焊接电弧信息的研究。华南理工大学博士学位论, 2000 年
- [3] K Y Bae , T H Lee , K.-C. Ahn. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe. *Journal of Materials Processing Technology* , 2002 ; v120 : 458-465
- [4] [16]A De and D Parle. Real time seam tracking system for automated fusion arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining* , 2003 ; Vol.8(5)5 : 340-346
- [5] 陈新征, 王克争。线阵 CCD 焊缝跟踪系统的应用研究。焊管, 2003 ; 26(4) : 12-14
- [6] 何景山, 杨春利, 林三宝等。无辅助光源图像的 TIG 焊焊缝跟踪传感系统。焊接学报, 2000 ; 21(1) : 37-40
- [7] E.Kannatey-Asibu. Milestone developments in Welding and Joining Processes. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997, vol.119(11): 801-810
- [8] M.Ushio and W.Mao, Sensors for Arc Welding: Advantages and Limitations. *Transactions of JWRI*. 1994, Vol.23(2): 135-141
- [9] Hong Yue. Recognition and tracking of large seam based on robotic vision, dynamic system and control division.2000
- [10]C-H Kim, S-J Na, A study of an arc sensor model for gas metal arc welding with rotating arc Part 2: simulation of an arc sensor in mechanically rotating gas metal arc welding, *Proc Instn Mech Engrs*, Vol 215 Part B, IMechE 2001:1281-1289
- [11]周律, 陈善本, 林涛。弧焊机器人焊缝跟踪方法的研究现状, 焊接快讯, 156 期
- [12]Mi, Bao, Ume, Charles. Real-time weld penetration depth monitoring with laser ultrasonic sensing system.*Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2006, vol.128(1): 280-286
- [13]Kita, A, Ume, I.C. Measuring on-line and off-line noncontact ultrasound time of flight weld penetration depth. *Welding Journal*. 2007, Vol. 86(1): 9-17
- [14]Sato, Hiroshi, Katayama, Masahiro, Hamajima, Takayuki, Kanamaru, Yasuhisa. Development of a 3D ultrasonic inspection device for pipeline girth welds. *Proceedings of the ASME International Pipeline Conference 2006*. 2007: 651-655
- [15]Matsuura, H., Kaji, A. Evaluation of tensile strength of partial penetration butt welded joints. 2001, Vo. 44(4): 514-519
- [16]Y.Koiono. Relation between Surface Temperature and Reverse Side Bead Width in TIG Welding of Thin Mild Steel Plate. *Journal of the Japan Welding Society*. 1982, Vol. 51(3): 52-55
- [17]Y.Koiono. Control System of Reverse Side Bead Width Surface Temperature Monitoring of

- TIG Weld. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 1986, Vol. 4(2): 58-67
- [18] S.Nagarajan, W.H.Chen and B.A.Chin. Infrared Sensing for Adaptive Arc Welding. Welding Journal. 1989, Vol. 68(11): 462s-466s
- [19] S.Nagarajan and B.A.Chin. Infrared Image Analysis for On-line Monitoring of Arc Misalignment in Gas Tungsten Arc Welding Processes. Materials Evaluation. 1990, No. 12: 1469-1474
- [20] S.Nagarajan, B.A.Chin and W.Chen. Control of the Welding Process Using Infrared Sensors. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1992, Vol. 8(1): 86-93
- [21] A.C.Guu, S.I.Rokhlin. Computerized Radiographic Weld Penetration Control with Feedback on Weld Pool Depression. Materials Evaluation. 1989,(10):1204-1210
- [22] A.C.Guu, S.I.Rokhlin. Arc Weld Process Control Using Radiographic Sensing. Materials Evaluation. 1992, (11): 1344-1348
- [23] S.I.Rokhlin, A.C.Guu. Computerized Radiographic Sensing and Control of an Arc Welding Process. Welding Journal. 1990, Vol.69(3): 83-95
- [24] S. B Chen , Y. Zhang , T. Qiu , T Lin., Welding Robotic Systems with Vision Sensing and Self-learning Neuron Control of Arc Weld Dynamic Process, J. of Intelligent and Robotic Systems, 2003, vol.36,No.2:191-208
- [25] C.G.Morgan, J.S.Bromley, P.G.Davey. Visual Guidance Techniques for Robot Arc Welding . Proceeding of 3rd International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, 1983: 615-619
- [26] 张裕明, TIG 焊熔透正面视觉自适应控制的研究, 哈尔滨工业大学博士学位论文 . 1990
- [27] S. B Chen, Y. Zhang, T Lin, T. Qiu, L Wu, Welding Robotic Systems with Vision Sensing and Real-time Control of Dynamic Weld pool during Pulsed GTAW, Int. J. of Robotic and Automation, 2004,vol.19,No.1: 28-35
- [28] Y.M.Zhang, R.Kovacevic, L.Wu. Closed-loop Control of Weld Penetration Using Front-Face Vision Sensing. Journal of Systems and Control Engineering. 1993, Vol. 207(3): 27-34
- [29] J.E.Agapakis, J.Bolstad. Vision Sensing and Processing System for Monitoring and Control of Welding and Other High Luminosity Processes. International Robots&Vision Automation Conference, 1991: 23-29
- [30] S. B. Chen, T. Qiu, et al., Intelligentized technologies for robotic welding, Series Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2004,vol. 299: 123-143
- [31] T.Hoffman .Real-Time Imaging for Process Control .Advanced Materials & Processes .1991 , (9) : 37-43
- [32] 王伟, 邹奇仕, 朱六妹, 宋国军。视觉传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨。电焊机。2002.5

- [33]王其隆。弧焊过程质量实时传感于控制[M]。北京：机械工业出版社。2000
- [34]Lee S K.A study on automatic seam tracking in pulsed laser edge welding by using a vision sensor without an auxiliary light source.Journal of Manufacturing Systems.2002,21(4)
- [35]马颂德,计算机视觉,北京,北京科学出版社,1998.
- [36]陈新征,王克争.线阵 CCD 焊缝跟踪系统的应用研究.焊管,2003;26(4):12~14
- [37]Roberts.L.G, Machine perception of three-dimensional solids, Optical and Electro-Optical Information Processing, Cambridge, MA,MIT Press,1965:159-197.
- [38]贾云得,机器视觉,北京,科学出版社,2000.
- [39]A.K.Mackworth, Interpreting pictures of polyhedral scenes, Artificial Intelligence, 1973,4(2): 121-137.
- [40]章毓晋,图像理解与计算机视觉,北京,清华大学出版社,2000.
- [41]吴立德,计算机视觉,上海,复旦大学出版社,1993.
- [42]王天珍,计算机视觉研究进展,武汉汽车工业大学学报,1998,Vol.20,No.1:23-27.
- [43]Thompson W B Qualitative Constraints for Structure from Motion CVGIP Imageunderstanding,1992,56(1):69-77
- [44]Bajcsy R, Active Perception, Proc. Of IEEE,1988,76(8):996 1005.
- [45]Ballade D.H, Brown C.M, Principles of Animate Vision, CVGIP Image Understanding, 1992,56 (1):3-21.
- [46]Aloimonos Y, Rosenfeld A,A Response to “Ignorance, Myopia, and Naive in Computer Vision systems” by R.C. Jain and T.O. Binford, CVGIP Image Understanding,1991,53(1):120-124.
- [47]曹承志, 编著。微型计算机控制新技术。北京：机械工业出版社 2002
- [48]朱喜林,张代治主编。机电一体化设计基础。北京：科学出版社 2004
- [49]张君安主编。机电一体化系统设计。北京：兵器工业出版社,1997
- [50]赵松年,张奇鹏编。机电一体化机械系统设计。上海：同济大学出版社,1990
- [51]马之行,敬刚。机电一体化技术。成都：四川科学技术出版社,1988
- [52]刘杰等编著。机电一体化技术基础与产品设计。北京：冶金工业出版社,2003
- [53]Chen S. B., Lou Y. J. and Wu L. ,Intelligent methodology for sensing, modeling and control of pulsed GTAW: Part1-bead-on-plate welding , Welding journal, 2000, Vol.79(6): 151-163 .
- [54]Pietrzak K. A. , Packer S. M., Vision-Based Weld Pool Width Control[J]. ASME Journal of Engineering for Industry. 1994 , 116(2) : 86 ~ 92
- [55]刘玉池. 计算机视觉脉冲 TIG 焊正面实时检测与熔宽控制的研究[硕士学位论文], 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 1994 .
- [56]王惠钧, 图像传感变极性等离子弧焊缝稳定成形闭环控制[博士学位论文], 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 1998,19-23 .
- [57]高守传,姚领田等编著。Visual C++实践与提高—数字图像处理与工程应用。中国铁道

出版社，2005

[58]何斌. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001.

[59]尚涛编著。机电控制系统设计。北京：化学工业出版社，2006

致 谢

衷心的感谢我的导师林涛副教授，本文是在他的悉心指导下完成的。林涛副教授丰富的实际工作经验，严谨的治学态度和创新的的精神使学生受益匪浅。每次遇到技术难题，林老师都会为我提出建设性的意见，帮助我走出困境。同时，林老师在我学习和生活中都给予了诸多的关怀。在值此论文完成之际，谨向林老师致以最诚挚的谢意。

在课题的进行过程中得到了陈善本教授的指导，陈老师知识渊博，学术造诣很高，对课题提供了许多有益的建议，对工作的认真态度和饱满的热情也使我深受感染。在此向陈老师表示衷心的感谢。

在课题进行期间，本课题组的马宏波博士给予了大力的支持和帮助，我们经常共同讨论，解决难题，在这里感谢马博士在科研上给予的帮助和在生活上给予的关心。

感谢上海航天局第 800 研究所李乐洲副所长、侯正全副所长、杨学勤副总工程师，李来平博士、卢碧琨高级技师、胡明华工程师等人对本文研究的项目的大力支持和试验工作中提供的帮助。

感谢我们课题组中共同学习和生活的博士和硕士们。两年多以来的生活和学习使我们建立了深厚的友谊。他们是沈鸿源、陈华斌、王继锋、孔萌、陈波、叶震、张涛博士，严浩、吴迪、马超、杨芳硕士，与他们的探讨给予我很大的启发。

感谢我的父母和其他家人在我求学生涯中所给予我的关心和帮助。

最后，谨向给予我指导、关心和帮助的所有老师、同学和朋友们再次表示衷心的感谢！

本论文工作得到国家“十一五”基金项目（51318050110）和航天局 800 研究所的资助。

攻读硕士期间发表的学术论文

1. 盛仲曦, 李来平, 林涛, 等, 一种基于被动视觉的焊缝图像实时获取与处理方法, 上海交通大学学报, VOL.42 (Sup.1), : 84 - 86