

中图分类号 TP393
学科分类号 081203

论文编号 1028704 10-0108

硕士学位论文

基于 CCD 被动光的 GMAW 管道打底 焊监控系统研究

研究生姓名	张敏
学科、专业	计算机应用技术
研究方向	计算机网络
指导教师	李静 副教授

南京航空航天大学

研究生院 信息科学与技术学院

二〇一〇年十二月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Information Science and Technology

Research on Monitoring System Based CCD Passive Light for GMAW Pipe Welding

A Thesis in

Computer Science and Technology

by

Zhang Ming

Advised by

Vice-Professor Li Jing

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

December, 2010

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将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、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：_____

日 期：_____

摘 要

管道焊接自动化是管道事业的发展方向,GMAW 焊凭借其产量高的优势被广泛应用在管道焊接中。但由于管道焊接环境的复杂,焊接过程的质量控制成为了首要问题,相关技术的研究也就成为了工控、计算机领域的一个热点。

本文在华恒公司原有设备基础上开发了一个基于被动光的 GMAW 焊监控系统,系统主要实现了采用 CCD 视觉传感器配合滤光片,获取焊区的熔池图像,经过图像处理得到偏差量,最后由控制系统控制执行机构完成焊接的过程。本文主要对监控系统中的图像处理系统和控制系统进行了深入的研究。

图像处理系统中,本文针对焊接前、焊接过程中图像信息的不同,设计了相应的图像处理方法:根据焊前图像信息单一的特点,设计了基于自适应阈值分割和直线拟合的简单的焊前校准方法;在分析现有图像边缘检测技术优缺点的基础上,提出了一种基于数学形态学和主动轮廓模型的熔池边缘检测方法,提高了焊丝、焊缝提取的精度;最后利用加权平均的思想,在边缘检测的基础上,实现了焊缝位置的自动识别。

控制系统中,本文分析了焊缝跟踪过程,根据坡口间隙的变化,提出了基于 PID 控制器的实时控制方法,实现了不同间隙宽度下的焊缝自动跟踪过程。

最后开发了监控系统软件,并在真实环境中对管件进行焊接试验,结果表明,该系统能够实现焊缝自动跟踪和全程监控的目的,性能稳定,具有较高的使用价值。

关键词: 焊接自动化, GMAW 焊, 监控系统, 图像处理, 焊缝跟踪

Abstract

Welding automation is the development tendency of pipe welding. GMAW welding is widely used in this region with the advantage of high quality. Considering of complex environment, quantity control and welding automation technology related became a hotspot recently.

Paper designs a monitoring system based on the original equipment, which is produced by HUAHENG Welding Co.,Ltd.. It achieves automatic welding process. Firstly we obtain the area of molten pool through a CCD vision sensor with a suitable filter, then the image processing system computers the deviation. Finally the controller orders the actuator to complete the welding process. Paper focuses on the research on the image processing system and controlling system.

Paper analyzes the images of different welding stages and presents corresponding algorithms. According to the characteristic of images before welding, a calibration method was designed based on adaptive threshold adjusting and linear fitting. Edge detection is studied and a method of mathematic morphology and active contour model is worked out, aiming at improving the accuracy of seam extracting. Lastly we recognize the welding seam based on edge detection and weighted average.

Then paper analyzes the seam tracking process, proposed a real-time control method based PID controller to achieve seam tracking process, under different groove gaps.

Finally we develop a complete set of monitoring system software and test its performance in the real environment. Results show that the system can meet users' requirements and has high using value which achieves weld automatic tracking and monitoring,

Keywords: Weld Automation, GMAW Welding, Monitoring System, Image Processing, Seam Tracking

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 焊接自动化研究现状.....	2
1.2.1 GMAW 管道打底焊技术.....	2
1.2.2 焊接监控系统研究现状.....	2
1.2.3 质量控制研究现状.....	3
1.2.4 焊缝自动跟踪技术研究现状.....	4
1.3 焊接监控系统中的视觉传感系统.....	4
1.4 存在的问题及课题的研究内容.....	5
1.5 论文的组织结构.....	6
第二章 焊接监控系统.....	7
2.1 焊接监控系统概述.....	7
2.1.1 监控系统的组成.....	7
2.1.2 监控系统工作流程.....	7
2.2 硬件设计	9
2.3 视觉传感系统概述.....	11
2.4 V 型坡口管道焊接工艺.....	12
2.5 本章小结	12
第三章 图像处理技术.....	13
3.1 预处理	13
3.1.1 灰度化	13
3.1.2 滤波去噪.....	13
3.1.3 二值化	14
3.2 边缘检测	16
3.2.1 传统的边缘检测.....	16
3.2.2 数学形态学.....	16
3.2.3 主动轮廓.....	17
3.3 特征提取	18
3.4 图像处理技术在焊接领域中的应用.....	19

3.5 本章小结	20
第四章 基于图像处理的 GMAW 焊图像特征提取	21
4.1 焊接图像特征.....	21
4.2 基于 OSTU 与直线拟合的焊前校准	21
4.2.1 焊前校准功能.....	21
4.2.2 基于 OSTU 与直线拟合算法的提出	22
4.2.3 实验结果分析.....	23
4.3 基于数学形态学与 CV 主动轮廓的熔池边缘提取	24
4.3.1 熔池边缘提取算法的提出.....	24
4.3.2 边缘提取算法原理.....	24
4.3.3 实验结果分析.....	27
4.4 基于 Sobel 滤波与 CV 主动轮廓的焊缝与焊丝提取	29
4.4.1 焊缝自动跟踪系统中的图像处理.....	29
4.4.2 焊丝特征信息提取.....	29
4.4.3 焊缝特征信息提取.....	30
4.4.4 实验结果分析.....	31
4.5 本章小结	32
第五章 焊缝跟踪过程控制分析.....	33
5.1 焊缝自动跟踪系统.....	33
5.1.1 焊缝自动跟踪系统概述.....	33
5.2.2 纠偏算法.....	34
5.2 基于 PID 实时控制策略	36
5.2.1PID 控制器	36
5.2.2 实时控制.....	36
5.2.3 控制策略.....	37
5.2.4 仿真实验结果分析.....	37
5.3 步进电机控制.....	38
5.4 本章小结	38
第六章 基于被动光的 GMAW 管道打底焊监控系统软件	40
6.1 系统软件功能概述.....	40
6.1.1 系统界面.....	40
6.1.2 系统功能.....	41

6.1.3 系统主要功能模块.....	42
6.2 系统的软件实现.....	44
6.2.1 系统开发工具.....	44
6.2.2 系统实现的关键技术.....	44
6.3 系统软件的测试应用.....	45
6.4 本章小结	47
第七章 总结和展望	48
7.1 论文的主要工作及贡献.....	48
7.2 下一步的工作.....	48
参考文献	50
致谢	54
在学期间的研究成果及发表的论文.....	55

图清单

图 1.1 论文组织结构图.....	6
图 2.1 系统结构图.....	8
图 2.2 系统功能流程图.....	8
图 2.3 硬件系统图.....	9
图 2.4 硬件系统图.....	10
图 2.5 控制设备实物图.....	11
图 2.6 视觉传感系统实物图.....	11
图 4.1 GMAW 打底焊典型图像.....	21
图 4.2 焊前校准位置示意图.....	22
图 4.3 焊丝校准效果图.....	24
图 4.4 焊接缺陷图像.....	25
图 4.5 邻域处理腐蚀方法.....	26
图 4.6 本文方法迭代过程.....	28
图 4.7 不同初始轮廓提取结果.....	28
图 4.8 有无预处理的主动轮廓方法对比.....	28
图 4.9 本文方法与 sobel 算子和数学形态学边缘提取效果比较	28
图 4.10 特征信息提取效果图.....	31
图 4.11 序列焊缝与及焊丝提取结果	32
图 5.1 焊缝自动跟踪流程图.....	33
图 5.2 预测控制模型.....	36
图 5.3 不加预测控制仿真图.....	38
图 5.4 预测控制仿真图.....	38
图 6.1 监控软件界面.....	40
图 6.2 主程序功能流程图.....	41
图 6.3 软件结构	44
图 6.4 管 MIG 打底焊成型前后对比	46

表清单

表 4.1 焊前校准伪代码.....	22
表 4.2 提取坡口拐点伪代码.....	23
表 4.3 腐蚀算法伪代码.....	26
表 4.4 边缘提取算法伪代码.....	26
表 4.5 时间数据表.....	28
表 4.6 焊丝特征提取伪代码.....	30
表 4.7 焊缝特征提取伪代码.....	30
表 4.8 图像处理精度表.....	32
表 5.1 无横摆纠偏算法伪代码.....	34
表 5.2 固定横摆纠偏算法伪代码.....	35
表 5.3 自动横摆纠偏算法伪代码.....	35
表 6.1 焊丝校正模块.....	42
表 6.2 图像处理模块.....	42
表 6.3 无横摆纠偏模块.....	43
表 6.4 有横摆纠偏模块.....	43
表 6.5 自动横摆纠偏模块.....	43

注释表

GMAW	Gas Metal Arc Welding	熔化极气体保护电弧焊
MIG	Metal Inert Gas Arc Welding	惰性气体金属电弧焊
MAG	Metal Active Gas Arc Welding	活性气体保护电弧焊
CCD	Charg-coupled Device	电荷耦合元件
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding	钨电极惰性气体保护焊
TIG	Tungsten Inert Gas	钨极气体电弧焊
PTIG	Pulse-TIG	脉冲钨极气体电弧焊
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
PCI	Peripheral Component Interconnect	外设部件互联标准
PID	Proportional Integral Differential	比例、积分、微分

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

焊接是制造行业中最重要的高新技术之一，它在机械制造、核工业、航空航天、交通运输等行业中的应用十分广泛。随着社会与科学技术的发展，焊接已从简单的手工毛坯制造发展成为了一项依照基础工艺和精确尺寸来制造成品的生产手段。但是考虑到焊接过程中工作条件恶劣、工程量大、质量要求高等等特点，原始的手工焊接明显已经不能满足现代高技术产品制造在数量和质量上的要求，因此，在保证焊接质量和产品稳定性的前提下，提高生产率、降低人为因素、缩短生产周期，已经成为了现代焊接制造工艺领域中亟待解决的问题^[1]。

1962 年美国推出世界上第一台 Unimate 型和 Verstra 型工业机器人，这是焊接自动化史上的一个革命性进步。截止 2008 年底全世界据估计已累计安装大约有 1,970,000 万台工业机器人装机运行，这其中应用于焊接方面大约占有 30%，以日、美、德为代表的发达国家则一直占有主要的份额，其中日本的工业机器人装备量更是占据了大约 60%。至 20 世纪末，我国实际使用工业机器人仅为 3500 台，到了 2005 年，我国工业机器人安装量达到 7000 台，截止至 2008 年末，我国已有工业机器人 31400 台^[2]，由此可见，国内对于工业机器人的需求量在快速增长。从数量上看，虽然焊接机器人在全世界的使用量巨大，但是绝大多数都仍然属于第一代的人工示教再现型机器人，这一类机器人无法适应焊接过程中环境的变化，并且其焊接的质量取决于操作者的技术和经验，可见并不能满足现在的质量需求。于是在上世纪 80 年代末，出现了基于离线编程和传感器检测技术的第二代焊接机器人系统^[3]，其中以传感器检测技术为基础的焊接自适应技术更加使得机器人系统具有智能传感和自动补偿的能力，扩大了其实际应用的范围。经过了几十年的发展，国内外学者们已经在自动焊接方面取得很多研究成果，同时电子技术、计算机技术、数控技术的发展也为焊接过程自动化提供了十分有利的技术基础，这都表明焊接过程自动化已成为焊接技术新的生长点之一，实现焊接产品制造的自动化、柔性化与智能化已经成为必然趋势，这也是未来焊接的主要发展方向^[4-7]。

在焊接自动化迅速发展的背景下，近年来我国管道运输事业也在核电设备、石油化工装置、煤液化装置、船用管线、输油输气管线、材料加工设备、制药机械和饮用水处理设备等相关行业中被广泛应用。国内能源结构的改变、制造业生产方式上的转型升级和各行业的高速发展，都为管道焊接提供了巨大的市场，同样也对管道建设过程中的焊接生产的质量和效率提出了更高的要求。由于管道焊接中过程，大型复杂工件的形状、尺寸极不规则，焊装夹具的装配精度达不到工艺要求，存在大量的随机干扰和不确定因素，不仅需要先进的焊接技术和焊接设备，成熟的焊接工艺，良好的管材材质等作为它的技术保障和前提，还需要有效地控制焊缝跟踪精

度与焊接质量。由此可见，管道打底焊焊接自动化技术已然成为了国内外焊接界研究的热点与难点。

1.2 焊接自动化研究现状

1.2.1 GMAW 管道打底焊技术

在管道焊接中，为了能够让焊接工件良好成形，最常使用到的焊接工艺包括 GTAW 焊和 GMAW 焊^[8]。其中 GMAW 焊全称为 Gas Metal Arc Welding，是一种熔化极气体保护电弧焊。GTAW 焊全称为 Gas tungsten arc welding，是一种钨极惰性气体保护焊，有时也被称作为 TIG 焊（Tungsten Inert Gas），二者唯一区别就是 GMAW 焊采用熔化电极达到焊接的目的，而 GTAW 焊采用钨作为不熔化电极。

GMAW 的焊接原理是：焊接电源使焊丝和焊接工件的材料之间产生电弧，于此同时，用保护气体密封焊接区域，融化焊丝和工件材质以达到焊接的目的。

从上个世纪五十年代至今，这两种焊接工艺被广泛应用在半自动焊接以及自动焊接领域。目前管道建设中管道对接环形焊缝的现场焊接中，GTAW 焊工艺得到的打底焊虽然具有成形好，质量可靠等等优点，但其生产效率低而导致不能大量应用。因此便于操作且产量高的 GMAW 焊就受到了越来越多的关注。GMAW 焊焊接过程中，存在的干扰较多，如弧光、烟尘、热变形等等，所以焊接过程中如何在保证产量的同时也能保证焊接质量，得到良好的焊接效果，成为了计算机、工控界、焊接界研究的热点问题。

1.2.2 焊接监控系统研究现状

利用焊接监控系统对焊接过程进行实时跟踪与监控是实现焊接全自动化的一个目标，目前国内外对于焊接监控系统的研究日趋成熟。加拿大 TECNAR 公司，开发了一个智能视觉监控系统。系统根据遥感图像信息丰富的特点，通过人工遥感来定位焊缝间歇的偏移量，利用熔池图像上不同密度的颜色和形状来识别目标及其位置，主要检测目标包括电弧、焊丝尖端、熔池的形状以及其最高温区域等。通过检测结果来控制熔池水平和垂直方向上的位移，保证温度最高点始终在屏幕最中央，达到焊缝跟踪和熔深控制的目的。上海交通大学的陈华斌^[9]针对航空航天事业中对焊接质量的高要求，在 GTAW 焊工艺下设计一个基于视觉传感的在线监控系统，对焊接过程中的变形预测、跟踪实时控制、熔池质量控制等方面进行了深入的研究，并对运载火箭动力系统的五通连接器进行了焊接，证明了其有效性。北京工业大学黄鹏飞等^[10]人设计并实现了 GMAW 焊网络监控系统，在焊接数据保证可靠传输的基础上，提高了焊接系统的抗干扰能力，保证了焊接质量。同样在这个方面做了研究的还有上海交通大学的黄峰、倪纯珍等^[11]人，不同点在于黄峰等人实现的是远程监控。合肥工业大学的王鑫^[12]实现了基于单片机的自动找正和热处理系统，设计了监控系统的软硬件。其根据焊机特点和焊机找正原理，模块化设计了找

正系统,并对热处理稳定性做了深入的研究,极大的提高了生产线的性能。还有叶彦斐等^[13]人针对人工焊接稳定性低的现状,对高压输气系统中的管塔设了一个监控系统,详细介绍了监控系统的人机界面和可编程逻辑控制部分的设计原理,监控系统达到焊接自动化、实时监控、提高焊接稳定性的目的。

由此可见,国内专门针对 GMAW 焊工艺,基于视觉传感的监控系统研究的并不十分成熟,因此,开发出一套完整的焊接监控系统来保证焊接质量,对实现焊接自动化具有一定的意义,并且在同类市场中具有相应的实用价值^[14]。

1.2.3 质量控制研究现状

焊接领域中,多是利用视觉传感系统得到的图像的特征信息来控制质量,而图像中最容易辨别、具有明显特征信息的部位就是熔池。因此,利用传感系统得到的熔池图像来保证焊接质量成为了质量控制的一个主流方向。

从二十世纪八、九十年代开始,国内外研究学者们就一直都进行着这方面的研究。其中研究成果较成熟的包括,国外 Kovacevic R、ZHANG Y M、LI L 等^[15]人采用高速相机和脉冲激光辅助照明捕获熔池图像,综合考虑熔池的大小、形状和几何参数,利用神经网络和实时图像处理的方法,研究了不同熔池参数和熔透情况的相互联系。同样 Haibo Fan、Nanda K.Ravla、Y.Bae 等^{[16][17]}针对 TIG、PTIG 熔池和焊缝进行了视觉传感实验研究,并在此基础上对熔池成型控制、焊缝跟踪等方面的应用进行了分析讨论。Wei Lu、YuMing Zhang 等^[18]人采用一种区间模型控制算法来控制熔深。国内上海交通大学^[19-21]在 GTAW 焊的熔池几何外形提取、熔透图像获取、焊缝成形、实时跟踪等方面,进行了大量的研究与分析,他们对不同熔池特征参数下的形状进行模拟,得到一个满足建模和实时控制要求的简单参数定义。通过这些参数提取焊接过程中熔池的形状和大小,从控制熔池动态参数来解决焊接精度的问题。此外他们还在三维特征提取方面进行了研究,获取了焊接过程中熔池表面凸出和下塌,部分熔透和全熔透状态下的图象。在此方面的研究成果也比较丰富的还有华南理工大学的薛家祥、哈尔滨工业大学的郑炜和南京理工大学的孙科等人。

可见国内外的较成熟的研究成果多集中在 TIG 焊和脉冲 GTAW 这一类干扰少、飞溅小的焊接工艺中,而对于在视觉传感系统中采用 GMAW 焊接工艺的研究才刚刚开始,山东大学的高进强、武传松等^[22]人将 CCD 视觉传感应用到 MIG 焊工艺中,通过这种熔池检测传感方法,提取到了完整的熔池轮廓图像和焊枪对中信息。南京理工大学游秋榕^[23]对 MAG 焊中熔池图像特征进行提取,并对图像灰度特点做了进一步研究,利用熔池图像特征来检测焊接过程中出现的一些焊接缺陷。

综合国内外研究成果不难看出,利用视觉传感得到的熔池信息来控制焊接质量的研究目前虽然已经取得了一些可喜的成果,但基仍需进一步研究和完善,有着相当多地工作需要完成。

1.2.4 焊缝自动跟踪技术研究现状

焊接过程中,如果环境因素稳定,焊接机器人可以精确地完成焊接操作,保证焊接质量。但是现实的环境并不理想,存在着各种干扰、变形和工件的缺陷等等因素的影响,就导致了焊缝在一定范围内变动。为了在焊接过程中,实时、精确地检测出焊缝的信息,使得各项参数能够适应实际焊接对象与环境的变化,学者们开始了对焊缝自动跟踪技术的研究。

北京清华大学^[24]在焊缝跟踪技术方面进行了多年的深入研究,在被动光和主动光两种环境下,对控制系统进行了研究,都取得不少研究成果。华东船舶学院和美国里海大学的 John 及 D.Wood^[25]利用缝隙对声发射波传播有影响的现象,研制成一种利用声发射和微处理器联合控制的焊缝跟踪系统。上海交通大学钱伟方、姚舜等^[26]人针对窄间隙焊接的特点,开发了一种闭环焊缝跟踪系统,来保证焊枪的始终对中。

此外在控制器方面的研究成果包括,湘潭大学的尹力^[27]研究了脉冲 GMAW 焊熔池的视觉传感与实时控制,给出了一种 PID 控制方法,达到检测与控制熔池变化的目的,在一定程度上满足了脉冲 GMAW 焊的实时性与精度要求。韩国的 KIM 等人则是采用了模糊控制器进行控制,这种智能控制方法不依赖于数学模型,为大多数研究者所亲睐,与之工作相类似的有广东工业大学的钱晨^[28]等人。后来为了使得系统在内部参数变化的情况下具有更好的适应能力,一部分带有自适应和自整定效果的控制器被设计出来,如南昌大学的叶建雄^[29]等人就设计了一种论域可调整的自适应模糊控制器用于旋转电弧机器人焊缝跟踪中,同样还有研究者将古典控制与智能控制相结合的方法,如南昌大学的贾建平^[30]设计了 FUZZY-PID 控制器,并将其应用到水下焊接此类相关的领域中去。

1.3 焊接监控系统中的视觉传感系统

一个功能完备、性能完善的焊接监控系统中,至少包括焊接过程中的传感技术、质量控制、过程控制三个部分。监控系统初始化开始工作的第一步就是要获得精确的图像特征信息,这样才能为后续的控制模块提供良好的先决条件。由此可见,视觉传感系统的性能,对提高图像处理的精确度、焊缝跟踪的精度以及熔池质量控制的精确度等系统性能方面都有着很大的影响,对实现焊接智能化具有重大的研究意义。

在焊接领域中,由于外部环境十分恶劣,使得传感器需要直接面对弧光、高温、烟尘、飞溅、振动和电磁场等干扰,这其中的大部分干扰很难甚至无法去除,因此应用于焊接领域的传感器必须满足以下几点要求:能够充分地反映焊接区域丰富的信息;要求传感信号具有较好的准确性、抗干扰性、实时性、信噪比等性能指标;还要求传感器结构简单、重量轻,体积小、安装方便以及价格、耐用性等等基本应用要求。现今焊接领域中常用的传感器可以分为接触式与非接触式两大类,其中接触式主要以机械式为代表。非接触式则包含有电弧式、光学式、电

磁式和超声波式，在焊接过程自适应控制中被应用的最多的是电弧式传感器和光学传感器。

据日本大阪大学焊接研究院的调查显示^[31]，光学式传感器将是未来传感器的发展方向，其主要分为主动式光学传感和被动式光学传感，其中主动式传感需要添加一些外部特殊的辅助光源，而被动光源类传感器主要基于可见光和红外光。

在现阶段焊接领域中，被广泛使用的 CCD（电荷耦合器件）就是一种光学传感器，具有体积小、价格低、图像清晰直观、灵敏度高、抗干扰能力强等优点，在人工监控或者自动检测熔池区域时被广泛使用。Wellington S. J.，Crowder R. M^[32]就是采用了 CCD 传感器，依靠滤光片以获得较为清晰的焊接区图像。Sadek C. A. Alfaro^[33]则利用双目立体视觉传感器建立了一个自动焊接系统，进行焊接 3D 特征检测，同样采取双目视觉传感器的还有 A. Bzymek、A. Czuprynski 等人^[34]。可见这一类的光学传感系统可以为图像处理系统和控制系统良好的输入条件，其自身性能的改进能够使焊接过程控制和质量控制跨上了一个新的台阶。

1.4 存在的问题及课题的研究内容

从基于被动打底光的 GMAW 管道打底焊技术的国内外研究状况和发展趋势来看，我们发现了在此领域中目前存在以下问题：

(1) GMAW 焊虽然具有生产效率高，便于操作，变形小等优点，但受到焊接电源和软、硬件条件的限制，这项工艺并没有能在管道打底焊中得到广泛应用。

(2) GMAW 管道打底焊中，焊接环境恶劣，存在着严重的飞溅和烟尘干扰，图像边缘提取困难，而且国内外对于焊接质量控制的研究多集中于 GTAW 焊领域中，因此 GMAW 焊中的质量控制是一个新的研究热点。

(3) 在焊接过程中的某些特定的情况下，焊枪需要在坡口中间摆动，从而导致熔池形状的变化，增加了实现自动跟踪目标的难度。

(4) 焊缝自动跟踪过程中，焊缝位置跟踪的实时补偿技术是一个研究难点。由于工件初始状态的不同会导致焊缝位置在空间内不断产生变化，国内外对于焊缝偏离时的纠偏控制算法进行了大量的研究，但对变间隙焊接的控制研究很少。

因此针对上述存在的情况，课题在建立基于 CCD 的被动打底光视觉传感系统的基础上，在焊接图像处理技术和管道打底焊跟踪控制这两个方面进行了深入的研究，并开发了一个基于被动光的 GMAW 管道打底焊监控系统，此系统保证了焊接质量，大大提高焊接生产自动化水平和自动焊接的灵活性，把握住了焊接跟踪技术发展的前沿，为 GMAW 管道打底焊领域技术的发展奠定了理论和实践基础。

本文的主要研究内容为：

- (1) 利用 CCD 相机和复合滤光技术组成的光学系统，实时获取清晰的焊接图像。
- (2) 研究图像处理技术的原理与模型，分析其在焊接领域的研究现状，综合其优缺点设计

适合 GMAW 焊工艺环境的焊前校准算法和熔池图像处理方法，实时处理焊接图像，获取精确的熔池边缘特征。并在此基础上设计焊丝提取和焊缝跟踪算法。

(3) 深入研究目前成熟的焊缝自动跟踪系统，结合当前焊接工艺，建立一个焊缝实时跟踪机制，在不同坡口宽度间隙下达到实时跟踪控制的目的。

(4) 设计并实现应用于 GMAW 管道打底焊领域的焊接监控系统。

1.5 论文的组织结构

本文共分为七章，组织结构图为图 1.1 所示：

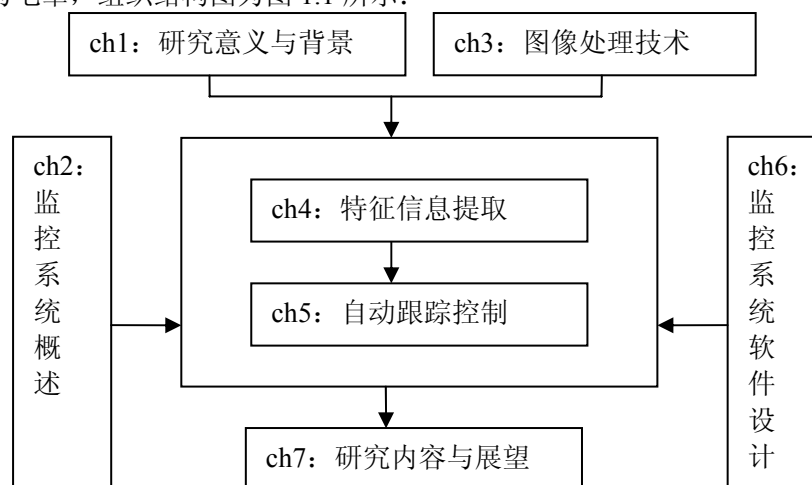


图 1.1 论文组织结构图

每章具体内容如下：

第一章分析了本课题的研究背景及意义，对焊接自动化技术作了概述，包括 GMAW 管道打底焊技术、质量控制技术、焊缝自动跟踪技术和视觉传感技术，然后针对现今焊接领域中存在的问题提出了论文思想，最后介绍了论文的主要研究内容和组织结构。

第二章概述了 GMAW 管道打底焊焊接监控系统的总体设计，介绍了系统功能结构、工作原理、各部分实现的关键技术，并对系统实现的硬件条件和焊接工艺进行了详细描述。

第三章介绍了图像处理流程中常用的几种图像处理技术，给出了原理描述、数学模型，并分析了其优缺点以及研究发展情况。

第四章在分析焊接图像的基础上，根据焊接前和焊接过程中图像特征信息的区别，设计了焊前校准、熔池边缘提取、焊丝和焊缝提取算法，并采用相应的开发工具对本文算法进行仿真和实验分析。

第五章研究了传统控制器 PID 控制器的原理，针对焊接实时性的需求，设计相应的纠偏算法和控制策略。利用图像处理得到的信息量，实现不同间隙下的焊缝自动跟踪和实时纠偏功能。

第六章为焊接监控系统的软件实现。

第七章对所做工作的总结，并对后续工作进行了展望。

第二章 焊接监控系统

焊接监控系统两大基本需求一是焊接前焊枪的自动校准，二是焊接过程中的自动跟踪与实时纠偏。本章首先对设计的 GMAW 管道打底焊焊接监控系统做了总体概述，然后介绍了其硬件环境和相关焊接工艺参数。

2.1 焊接监控系统概述

华恒 GMAW 管道打底焊焊接监控系统是一个基于工控机 (Industrial Personal Computer) 的焊接监控系统。该系统针对不同坡口宽度、工艺要求设计了相关处理算法和控制方法，实现了基于被动光焊接过程中的过程控制功能 (即焊缝自动跟踪功能) 和质量控制功能，为焊接过程自动化打下坚实基础。系统主要的实现目标有：实时熔池监测、焊接位置校准、焊缝位置及中心偏差信息确定、焊缝间隙变化检测、横摆参数自适应控制和纠偏控制。

2.1.1 监控系统的组成

整个焊接监控系统使用 VC 多线程技术开发，由视觉传感系统、图像处理系统、控制系统和执行机构四大部分组成，结构图如图 2.1 所示。视觉传感系统包括 CCD 相机和复合滤光技术，用于实时采集焊接前与焊接时的图像；图像处理系统贯穿于整个运行过程，主要用于提取熔池边缘、焊丝和焊缝的位置与宽度；控制系统结合图像处理系统得到的特征参数和控制方法得出纠偏量；最终，由执行机构完成自动焊接过程。

IPC 作为核心处理器，在系统中发挥着至关重要的作用。它是一种专门为工业现场而设计的计算机，比普通的计算机性能稳定，底板扩展性好，具有防震、防静电、防磁等功能。从功能连接上看，IPC 是整个系统的核心，将各个部分串联了起来。视觉传感系统就是通过接口电路将采集到的图像传送给 IPC，然后由 IPC 中的图像处理模块对接收到的图像进行处理，提取用于焊缝纠偏控制的有用特征参数，同时将这些参数信息传递给控制模块，控制模块根据所获得的特征参数和控制策略实时调整焊枪、摄像头的水平位移完成实时纠偏，并调节横摆宽度、速度等焊接工艺参数来控制焊缝成形；最终控制模块通过 Cable 连接执行机构，利用脉冲周期控制执行机构完成焊接过程。同时，IPC 也能通过接口电路与执行机构相连接，直接控制焊枪、管件、摄像头等部件。

2.1.2 监控系统工作流程

功能流程图如图 2.2 所示。具体执行步骤为：首先通过焊前校准调整焊枪位姿，保证 MIG 焊焊枪不仅要正对管件坡口正中央，还需要位于采集到的图像中心。随后开启焊接电源并启动变位机带动工件作旋转运动，开始焊接。由图像采集卡实时采集 CCD 摄像机拍摄的焊接熔池

区域的视频图像，并根据所设计的图像处理算法，从熔池区域图像中提取特征信息，包括焊缝、焊丝的位置，熔池边缘信息，熔池前端焊缝坡口宽度，焊枪摆动宽度，焊丝对中信息等等，以此统计出焊丝中心位置与焊缝中心位置偏差信息。同时将所获得的图像特征信息传给工控机的控制卡，由它根据所设计的控制策略，输出相应的焊枪位置调整信号传送给焊枪位姿调整机构中的横摆步进电机驱动器，实时调整焊枪摆动宽度、中心位置，实现基于视觉传感的管道 MIG/MAG 打底焊纠偏控制过程，直到焊接过程结束。在此过程中，工控主机将相关信息标识在当前熔池区域图像上，并动态显示在工控机显示器上，供操作人员实时监控整个焊接过程。

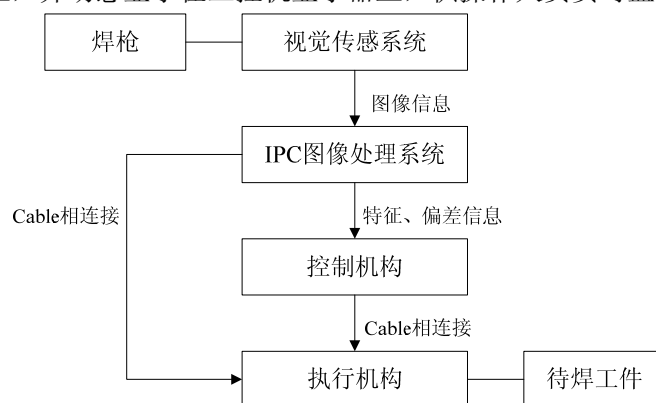


图 2.1 系统结构图

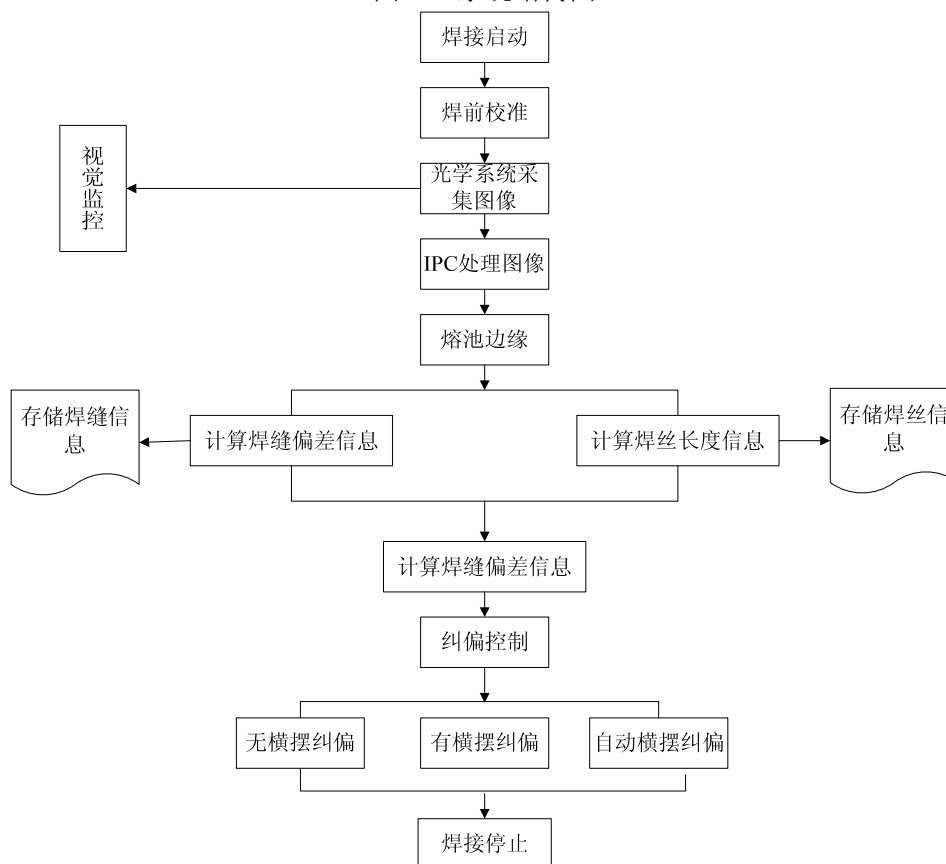


图 2.2 系统功能流程图

2.2 硬件设计

本文采用的试验硬件系统图如图 2.3 所示，主要由管道打底焊焊接设备、变位机、焊枪位姿调整机构、MIG 焊枪、接口电路，工业 CCD 摄像机，工控机以及 PC 机、焊接电源，送丝机等部分构成，是一个基于工控机（IPC）和可编程逻辑控制（PLC）模式，结合运动控制和焊接工艺参数设置的集成控制硬件平台。

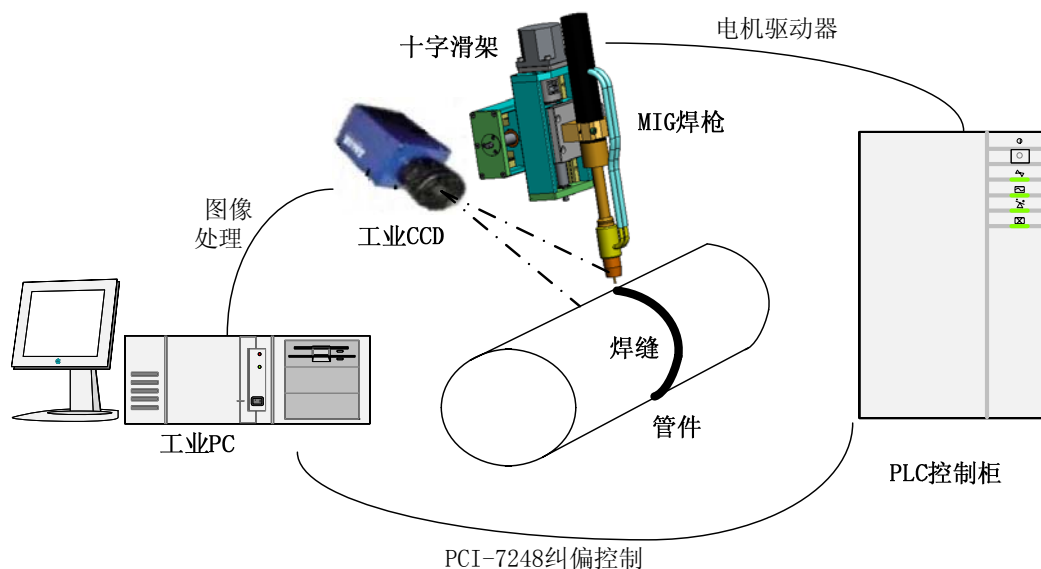


图 2.3 硬件系统图

(1) 焊接设备

在系统焊缝自动跟踪实验中，涉及到的焊接设备包括管道焊接设备、焊接电源、焊枪、摄像机、数据采集卡、送丝机、接口电路和保护气瓶等。其中主要的焊接设备是华恒 KBX04 管道焊接设备，为江苏昆山华恒焊接有限公司生产的 KBX01 管道焊接设备的升级版，焊接保护气采用的是 80%-82% 氩气和 20%-18% 二氧化碳混合气体。焊接设备实物图如图 2.4 所示。图中，待焊工件固定于变位机上，由变位机带动实现旋转运动。MIG 焊枪，CCD 摄像机，光学系统都固定在焊枪位姿调整机构上，位置始终不产生相对变化。在焊缝自动跟踪过程中通过移动焊枪位姿调整机构的水平位移来完成纠偏过程，它的主要组成部分包括十字滑块，两个步进电机及驱动单元，其中两个步进电机分别用来调整焊枪高度和焊枪横摆的形式。另外，焊接电源和送丝机为一套，采用的是德国生产的数字化冷弧焊接电源，型号为 EWM PHOENIX 521 EXPERT PULA FORCEARC。

(2) 工控主机（IPC）部分

图 2.5 中所示为系统核心处理器和视觉监控部分的实物图，包括主控计算机、显示器等。本实验系统中，采用显示器为 7' 工业液晶显示器。凌华公司生产的 ADLINK 工控机 P4-2.4G，256M-RAM，作为核心处理器，起到中心控制的作用。ADLINK 工控机的主要工作内容是对图

像采集卡采集的图像进行图像处理；完成熔池图像边缘，焊缝、焊丝位置和长度等特征信息的提取；采用接口电路与控制柜连接，通过控制横摆电机和微调电机完成跟踪控制，实现纠偏；作为系统的人机界面。工控机上有两块 PCI 卡，一个是 PCI 图像采集卡，型号为 PXC200AL，通过视频线和焊枪位姿调整机构上的 CCD 摄像机相连，用来采集图像到工控计算机。另一个是 PCI 数据采集卡，型号为凌华公司的 AD-LINK PCI-7248 数据卡，它的功能主要有完成焊接参数的设置和控制步进电机，通过数据采集卡，工控机与控制柜相连。

(3) 可编程逻辑控制（PLC）部分

焊接控制设备实物图中白色的为控制柜，控制柜中开放了 CAN（Controller Area Network）通讯接口、I/O 接口以及一个伺服控制包接口。其中，CAN 主要用于主控计算机和控制柜之间的通讯，将工控机上处理得到的信息传送给控制系统；伺服电机主要用于控制变位机的旋转。纠偏控制模块采用 AD-LINK PCI-7248 数据采集卡作为控制卡，根据图像处理模块给出的焊缝纠偏控制特征参数，输出控制信号，使用 PCI-7248 卡上的 8254 芯片软件控制脉冲周期来分别控制两个步进电机，实时进行焊枪横摆、高度自适应调整和纠偏。最终控制柜通过 Cable 与执行机构相连接，来控制执行机构完成焊接操作。

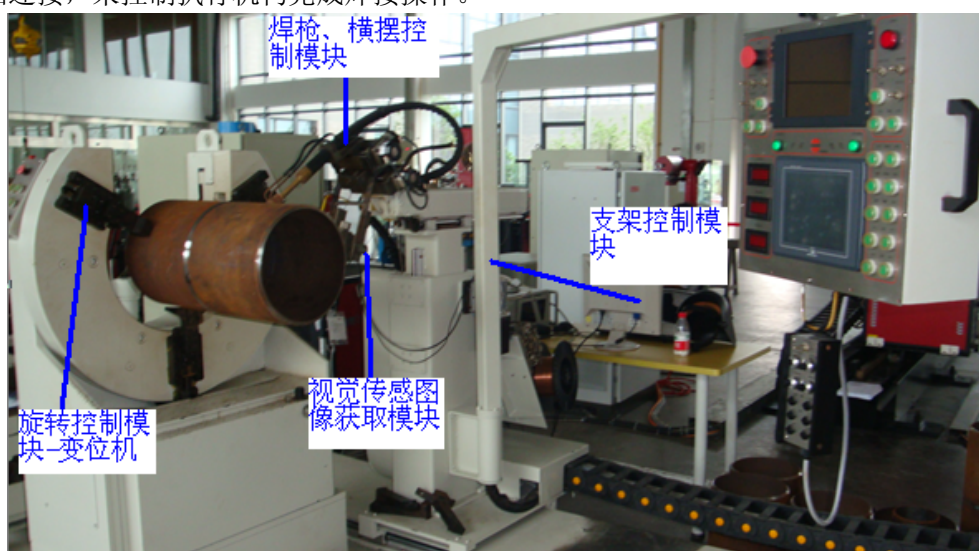


图 2.4 硬件系统图



图 2.5 控制设备实物图

2.3 视觉传感系统概述

视觉传感系统也称为光学系统，主要用于焊缝、熔池图像的采集，其实物图如图 2.6 所示：包括视觉传感器、镜头、滤光片、保护玻璃和图像采集卡等等。本系统为了方便摄像头沿管道表面焊接处切线方向观察熔池，在焊枪位姿调整机构上，视觉传感系统安装位置是距离焊枪头部 20 厘米，管子切线方向上偏离垂直线 30° 处。

视觉传感系统主要组成部分的参数具体为：

- (1) 采用 CCD 工业黑白相机；分辨率为 768×494 ；
- (2) 镜头型号为 SONY XC EI-50，镜头焦距 30mm；
- (3) 干涉滤光片波长为 980nm，峰值透过率 60%，由于焊接过程中弧光比较强，为了减少弧密度，我们添加了相应的滤光片来减弱弧光干扰；
- (4) 图像采集卡，每秒采集 23 帧图像。

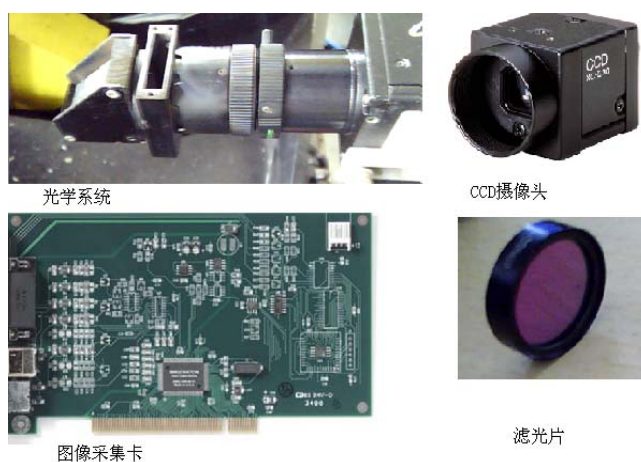


图 2.6 视觉传感系统实物图

2.4V 型坡口管道焊接工艺

管道打底焊中，管件焊缝轨迹在水平方向上观察呈现 V 型，我们在焊接电源、焊丝直径等硬件条件已被确定的情况下，针对不同的工件、材料等进行试验，依照快速准确的原则选择了优化的焊接工艺参数，保证了焊接质量。

系统试验中用到的焊接试件的管径约为 $300 \times 10\text{mm}$ 。坡口为单面 V 形坡口，角度大约为 37.5° ，坡口宽度在 $2\text{mm} \sim 6\text{mm}$ 范围内变化，两个管道间一圈用四个点焊点来固定。在焊接上述焊接试件时，为了实现减少焊接飞溅，完成高质量图像采集，采用 EWM-PHOENIX-521 为焊接电源，固定焊接电流为 120A ，焊接电压为 22.5V 以及焊丝直径为 1mm ，可以得出优化的焊接工艺参数如下：焊接速度为 0.25m/min ；焊丝伸出量： $12 \sim 15\text{mm}$ ；送丝速度 5.6m/min ；横摆宽度： 4mm （横摆自适应）；横摆速度 1800mm/min ；焊丝边缘停留时间 0.4s 。

2.5 本章小结

本章主要概述了 GMAW 焊焊接监控系统，主要包括如下内容：

1、概述了华恒 GMAW 管道打底焊监控系统的结构功能和工作原理：传感器将接收到图像信息传给 PC，PC 对焊缝偏差及偏差变化趋势信息进行计算处理后，向焊枪十字滑架调节机构发出指令信号，带动焊枪进行运动，从而实现焊枪对管件焊缝的自动纠偏。

2、构建了焊接监控系统的硬件试验系统，其主要由焊接设备系统，视觉传感系统（光学系统）、工控 PC 机、控制柜等部分组成。

3、介绍了本文使用的视觉传感系统。其添加了滤光系统，并且不用加激光发生器等任何辅助光源。摄像机和焊枪的位置相对固定，保证了焊枪始终处于由视觉传感图像得到的图像的正中央。

4、给出了 GMAW 焊焊接试验中的工件情况和采用的相应焊接工艺。通过仔细分析影响图像质量的相关工艺参数，经过经验丰富的操作工的反复实验验证下，得出了一系列相关的焊接工艺参数，监控系统在这些参数固定的条件下，通过视觉传感系统，能够采集到更加清晰、稳定的熔池图像。

第三章 图像处理技术

图像是各种采集系统获得的对客观物体的描述，其包含了大量实体信息，人眼可以通过对图像的观察获得自身所需的实体信息。而图像处理就是利用计算机技术通过对事物的各种形式的图像信息进行分析 and 处理，达到对图像进行描述、辨认、分类的目的。近年来随着社会的进步发展，图像处理技术被广泛应用在工业、农业、国防、科学研究和医学各个领域。任何基于视觉的系统中，图像处理技术都是其不可分割的一个重要部分，在合适的场合选取合适的图像处理算法，可以有效的改善图像的视觉效果，有利于后续的工作的开展。

一般的图像处理流程分为图像预处理，边缘检测和特征提取三个部分。

3.1 预处理

光学系统采集到的图像，受到外部环境和物体内部条件的影响，往往图像质量并不理想，不仅包含目标信息，还会存在各种干扰信息。因此为了使图像信息量变得少而唯一，目标特征更加简练，必须对图像进行预处理。

图像预处理主要是图像间的变换处理，主要包括图像平滑、变换、增强和恢复等功能^[35]，我们介绍几种常用的预处理方法。

3.1.1 灰度化

灰度化指的是将彩色图像转化成灰度图像的过程。因为彩色图像中每个像素点的颜色由红、绿、蓝三个分量组成，而每一个分量又有 255 种取值，由此可见对彩色图像直接进行处理，会很大程度增大计算机的工作量，于是采用一定的转换规则将彩色图像转换成灰度图像是必须的一个过程。常用的两种转换规则：一是计算每个像素点的三个分量的平均值，将其赋给这个像素颜色的三个分量；另一个则是通过空间变化关系将颜色分量转换成图像的亮度值，如 RGB 和 YUV 空间的变换关系就表示为 $Y=0.3R+0.59G+0.11B$ 。

3.1.2 滤波去噪

图像采集过程中受到各种噪声源的干扰，在图像上表现为各种干扰点，为了不让它们对后续的图像处理带来太大的影响，我们采用滤波方法对图像去噪。滤波去噪主要分成空域滤波去噪和频域滤波去噪两部分。

(1) 空域滤波

空域滤波指在空间域中进行滤波处理，多采用模板跟图像在相对应的位置上进行运算，存在着空间上的对应关系，因此称为空域滤波，其大致分为线性滤波与非线性滤波两种。

其中线性滤波一般采用滤波模板对图像进行卷积处理，设原图像为 $I(x, y)$ ，滤波模板为

$F(x, y)$ ，模板大小通常为奇数 $(2m+1, 2n+1)$ ，则经过滤波处理的图像可以通过下式表示：

$$D(x_0, y_0) = \sum_{-m \leq i \leq m} \sum_{-n \leq j \leq n} I(x_0 + i, y_0 + j) \times F(i, j) \quad (3.1)$$

即将中心点 (x_0, y_0) 与模板中心对齐，在模板大小范围内做卷积运算。为了防止在去除噪声的同时不致让边缘受到太大影响，此时模板大小的选择一般为 3×3 比较合适，相应的卷积公式也就可以表示为：

$$D(x_0, y_0) = \sum_{-1 \leq i \leq 1} \sum_{-1 \leq j \leq 1} I(x_0 + i, y_0 + j) \times F(i, j) \quad (3.2)$$

常用的模板有 $F_1 = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ 、 $F_2 = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$ 、 $F_{3x} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{pmatrix}$ 、
 $F_{3y} = \begin{pmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$ 等等。其中 F_1 是均值滤波的模板， F_2 为高斯滤波的模板， F_3 为 Sobel 滤

波水平和垂直两个方向上的滤波模板。

但是这类滤波存在着去除噪声的同时也模糊了图像的边缘的问题，随之人们开始对非线性滤波展开了大量的研究，最为人们所熟识就是中值滤波方法，其主要思想是将某个像素点的值用该点某个区域内像素点灰度值的中值表示，在某些情况下可以中值滤波可以做到既去除噪声又保护了图像的边缘，但同样存在着会模糊目标区域的弱点，因此为了不损失原始图像信息，人们在中值滤波的基础上改进得出了一种新的处理方法，即在滤波处理中加入判断过程，对图像的像素点进行检测，判定是非目标像素点时才对其进行滤波处理，这样就大大提高了正确率。

(2) 频域滤波

频域滤波指利用一些正交变换方法，将图像从空域中转化到频域中去进行滤波处理，最后通过逆变换得到结果。

频域滤波中主要的正交变换主要包括傅立叶变换、离散余弦变换、小波变换等。其中傅立叶变化最常应用，其通过公式 3.3 将空域中较难表达的特征在频域中给出了很好的诠释。

$$\begin{cases} F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \\ f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{cases} \quad (3.3)$$

3.1.3 二值化

图像的二值化是将灰度图像上像素点的灰度值置为 0 或者 255，让图像显示有明显的对比效果。为了得到对比度鲜明的二值图像，一般采用阈值分割技术：选择适当的阈值，根据阈值将背景与目标分离，其原理如下式所示，其中原始图像为 $I(x, y)$ ，阈值选择为 Z ，分割后的图

像 $B(x, y)$ 可以表示为:

$$B(x, y) = \begin{cases} 0, I(x, y) < Z \\ 1, I(x, y) \geq Z \end{cases} \quad (3.4)$$

可见, 在二值化处理过程中, 阈值的选择至关重要, 目前根据阈值选择的策略二值化技术主要分为整体阈值二值化、局部阈值二值化和动态阈值二值化。整体阈值二值化指阈值大小仅由像素点 (x, y) 的灰度值 $I(x, y)$ 决定, 局部阈值二值化指 $I(x, y)$ 由像素点本身和周围点的灰度值共同决定, 而动态阈值二值化指在局部阈值的基础上, 增加像素位置的因素。

现在常用的阈值分割多为整体阈值法, 从最初通过经验人工设定阈值到利用图像的灰度级、归一化直方图来自动确定阈值。但是这些手工调节阈值和单纯的固定阈值分割, 遇到外界环境变化时, 阈值不能改变, 不具有自适应性。因此现在基于物体、环境和应用领域的图像分割算法越来越受欢迎, Ostu 自适应阈值分割方法就是其中最具有代表性的一个。

Ostu 是 1979 年由日本学者大津^[36]提出的基于类间方差最大化的自动获取阈值方法。其主要思想为, 在图像连通区域内计算类间方差, 将得到的最大值作为进行图像分割的最优阈值。

我们设图像的灰度为 M (每个像素点的灰度值在 $[0, M]$ 范围内变化), 图像中灰度级 i 个数为 n_i , 出现的概率为 p_i , 假设用来分割图像的阈值为 Z , 则小于阈值的像素点的概率表示为:

$$P_1 = \sum_{i=0}^Z p_i \quad (3.5)$$

大于阈值的像素点的概率为:

$$P_2 = \sum_{i=Z+1}^{M-1} p_i \quad (3.6)$$

相应的平均灰度为:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\sum_{i=0}^Z i * p_i}{P_1} \\ A_2 = \frac{\sum_{i=Z+1}^{M-1} i * p_i - \sum_{i=0}^Z i * p_i}{1 - P_1} \\ \mu(t) = \sum_{i=0}^Z i * p_i \\ \mu_T(t) = \sum_{i=Z+1}^{M-1} i * p_i \end{cases} \quad (3.7)$$

最后定义间类方差为:

$$\sigma^2 = A_1 * (\mu_0 - \mu_T)^2 + A_2 * (\mu_0 - \mu_T)^2 \quad (3.8)$$

在图像的灰度值范围内循环, 当阈值 Z 使得定义的间类方差值最大时, 则认为 Z 是最佳分

割阈值。

3.2 边缘检测

图像边缘是图像的基本特征，我们可以通过边缘来识别物体，图像处理过程中特征提取、识别都是建立在边缘检测的基础上的，可见边缘信息的重要性。在图形处理算法发展的过程中，研究学者们提出了很多新的观念和理论，从传统的边缘检测法到遥感图像边缘跟踪法。近年来针对某些领域中，图像的复杂度较高，各种干扰信息林立的情况，又出现了基于小波分析和变换的方法、分形理论和数学形态学、主动轮廓模型方法进行边缘检测的方法。

3.2.1 传统的边缘检测

物体的边缘多是图像上灰度变化最为剧烈的地方，在数学上可以用灰度的导数里表示变化，因此传统的边缘提取算法多是利用图像上灰度的变化率和方向来提取边缘的。

这一类的边缘检测方法最常用的就是模板法，让图像 $I(x, y)$ ，分别在水平和垂直方向上采用某个滤波算子 $F(x, y)$ 做卷积，得到图像两个方向上的亮度差分近似值 G_x 和 G_y ，计算梯度差分值 $G = |G_x| + |G_y|$ ，并对卷积结果求一阶或二阶导数，这个找到的位置就是对模板响应最大的部分，被认作是图像的阶跃位置，也就是边缘。其中常用的一阶导数算子有 Robert 梯度算子、Sobel 算子、Prewitt 算子等，二阶导数算子有 Laplace 算子、Kirsch 算子等。

传统的边缘提取算法在一般的图像边缘检测过程中，可以提取出比较清晰的边缘，但是也会存在一些缺点，如 Robert 算子虽然定位很准，但是在灰度渐变的图像中响应不是很好；Prewitt 算子得到的边缘不具有连通性，会出现断断续续的情况；Sobel 算子虽然可以有效的抑制噪声，可是在噪声干扰多的情况下还是难以很好的提取边缘；而 Laplace 算子虽然提取效果不错，但却对噪声比较敏感。因此在一些图像信息复杂，噪声多的工艺中，传统的边缘检测算法不能得到一个满意的边缘信息^[37]。

3.2.2 数学形态学

数学形态学^[38]是在集合代数和形态的基础上，分析几何形状和结构的一种数学方法。进行图像处理时，主要通过具有一定形态的结构元素（structuring element）去量度或者提取图像中的对应形状，可应用于图像去噪、图像滤波、图像分割、边缘检测等等过程中。一般分为二值图像形态学和灰度形态学，本文采用的是二值图像形态学。

基本的二值形态运算有四种：腐蚀（erosion）、膨胀（dilation）、开运算（open）、闭运算（close）。四种基本运算都是让结构元素在待处理的图像上平移，对每一个像素点进行交、并、补等集合运算，除去干扰的结构，而保留下有用的形状。其中腐蚀运算使区域变小，用于去除噪声；膨胀运算使区域变大，用来增强亮边缘，去除暗边缘；闭运算可以填充区域内的小孔和消除沿边

界的缺口；开运算可以去掉区域边缘由里向外的毛刺^[39]。其数学表示如下：

$$\text{腐蚀: } X \ominus S = \{x \mid x + s \in X \forall s \in S\}$$

$$\text{膨胀: } X \oplus S = \bigcup_{s \in S} S$$

$$\text{开运算: } X \circ S = (X \ominus S) \oplus S \quad (3.9)$$

$$\text{闭运算: } X \bullet S = (X \oplus S) \ominus S$$

其中 X 为目标图像， S 为结构元素。利用结构算子中的像素点与图像进行运算，最终由运算值决定中心点的值，用这些运算子以及他们的组合能有效地处理图像。例如当结构元素为

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 腐蚀运算就是将待处理的图像中的每一个元素循环与结构元素做集合运算与运}$$

算，结果为真的时候，就保留这个元素点，否则抛弃。而膨胀运算是循环处理图像中的每一个像素点，二者至少有一个像素相交的时候，就保留这个像素点，否则就抛弃。开、闭运算，是腐蚀和膨胀运算的组合，操作相同。

3.2.3 主动轮廓

主动轮廓是上世纪 80 年代发展起来的一种图像处理方法，多用于图像分割，主要通过内部能量和外部能量共同作用，使得轮廓曲线能量极小化。其中内部能量由曲线自身特征决定，外部能量由图像特征决定。在构造能量函数时，只要将图像特征、目标特征正确考虑进去，初始轮廓就能收敛到图像中的目标。Kass 等^[40]第一次提出的主动轮廓模型（也称做 Snake 模型）的能量模型为：

$$E_{snake} = \int_0^1 \frac{1}{2} (\alpha(s) \|u_s(s)\|^2 + \beta(s) \|u_{ss}(s)\|^2) + E_{img}(u(s)) + E_{con}(u(s)) ds \quad (3.10)$$

Snake 模型^[41]是通过求解相应的欧拉方程(Euler-LagrangeEquation)来寻求模型的能量函数的最小值的。其中 $u_s(s)$ ， $u_{ss}(s)$ 是关于 s 的一阶、二阶导数，它们形成了内部力（internal force），这二者分别对应轮廓的拉伸能力（弹性 elasticity）和弯曲能力（曲率 curvature），每项的效果可以由参数 $\alpha(s)$ 和 $\beta(s)$ 控制。

但是，经典 Snake 模型对初始轮廓的要求较高，其要求初始轮廓线距离目标边缘较近，否则在没有图像力的情况下，形变曲线将收缩为一个点或一条线。针对这一问题改进 Snake 模型，就出现了后期的气球力 Snake，GVF Snake 和 Greedy Snake，但它们都是依赖于轮廓线参数化表示的模型，再如何改进也不能从根本上解决存在的问题。这样的情形下，出现了基于水平集方法的几何轮廓模型，这样轮廓线的拓扑变化能够得到自动处理^{[42][43]}。

Chan-Vese 主动轮廓模型是受曲线演化理论的启发，Caselles 等和 Malladi 等^[44]提出的几何活动轮廓模型（Geometric Active Contours）。该模型将轮廓线看作演化曲线，通过求解其演化方

程所对应的水平集函数，得到主动轮廓线的收敛位置。

其模型描述如下：

设定义域为 Ω 的图像 $u_0(x, y)$ 被闭合轮廓 K 划分为内部和外部两个不同的区域，两个区域的平均灰度分别为 c_1 和 c_2 ，构造如下能量函数：

$$F(K, c_1, c_2) = \mu \cdot L(K) + \nu \cdot S(K) + \lambda_1 \int_{\text{inside}(K)} |u_0 - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{\text{outside}(K)} |u_0 - c_2|^2 dx dy \quad (3.11)$$

其中 $L(K)$ 为轮廓曲线 K 的长度， $S(K)$ 为 K 所包围区域的面积， $\mu \geq 0$ 、 $\nu \geq 0$ 、 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 为各能量项的权重系数。当闭合轮廓 K 位于两同质区域的边界时，式 3.11 取得极小值，从而得到图像分割的目的。

模型采用水平集方法，形式化模型的能量函数：构造水平集函数， $\{w | \phi(x, y) = 0\}$ ，并设 ϕ 为符号距离函数。利用 Heaviside 函数以及 Dirac 函数：

$$H(w) = \begin{cases} 1, w \geq 0 \\ 0, w < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\delta(w) = \frac{dH(w)}{dw} \quad (3.13)$$

改写等式 3.11，得出：

$$F(\phi, c_1, c_2) = \mu \int_{\Omega} \delta(\phi) |\nabla \phi| dx dy + \nu \int_{\Omega} H(\phi) dx dy + \lambda_1 \int_{\Omega} |u_0 - c_1|^2 H(\phi) dx dy + \lambda_2 \int_{\Omega} |u_0 - c_2|^2 (1 - H(\phi)) dx dy \quad (3.14)$$

固定 ϕ ，计算 c_1 和 c_2 ，得：

$$c_1(\phi) = \frac{\int_{\Omega} u_0(x, y) H(\phi) dx dy}{\int_{\Omega} H(\phi) dx dy} \quad (3.15)$$

$$c_2(\phi) = \frac{\int_{\Omega} u_0(x, y) (1 - H(\phi)) dx dy}{\int_{\Omega} (1 - H(\phi)) dx dy} \quad (3.16)$$

最小化时，普遍采用的方法是在欧拉—拉格朗日方程上执行梯度下降方法，得到：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta(\phi) \left[\mu \nabla \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - \nu - \lambda_1 (u_0 - c_1)^2 + \lambda_2 (u_0 - c_2)^2 \right] \quad (3.17)$$

$$\phi(x, y, 0) = \phi_0(x, y) \quad (3.18)$$

等式 3.15、等式 3.16、等式 3.17 和等式 3.18 构成了能让等式 3.11 式极小化的偏微分方程。

3.3 特征提取

图像后技术中除了边缘检测技术，还包括 Hough 变换、直线提取等方法。通过这些方法将

图像中显示的目标特征提取出来，进行一一区分，为下一步工作做准备。在焊接领域中，图像后处理就指将图像中显示出的熔池、焊缝、焊丝不同特征一一提取，并将这些特征分析的结果转化成控制变量，传送给控制模块。本系统中涉及到的后处理技术并不多，仅在提取焊枪与焊丝中心时用到了直线拟合技术，将过程中得到的不连续的点拟合成直线段。

直线拟合技术现在最常用的是基于最小二乘法的拟合思想。假设直线 $y = kx + b$ ，提取的点集合为 $(x_i, y_i), 1 \leq i \leq N$ ，则直线段的斜率 k 和常数 b 可以由下式确定：

$$\begin{cases} b = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N} - k \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \\ k = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{N} - \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{N} - (\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N})^2} \end{cases} \quad (3.19)$$

3.4 图像处理技术在焊接领域中的应用

(1) 滤波去噪

空域滤波方法的研究早已成熟，其在焊接领域中的应用也日臻完善。范方蕾、李亮玉等^[45]人就在 GMAW 焊中，自适应维纳滤波、GAMMA 值增强和 Otsu 阈值分割对图像进行了预处理，为后期熔池图像的分析做好了准备。此外还有学者^[46]将 KALMAN 滤波应用到基于熔池观测的焊缝跟踪问题中去。

此类空域滤波虽然能够有效去除高斯噪声，但是对焊接领域中一些高频噪声却无能为力，高向东、赵传敏等^[47]提出了一种结合空域滤波和频域滤波的预处理方法，此方法虽然克服了空域滤波的不足之处，但是由于噪声对应的变换后图像的高频部分，所以只能处理与图像信息频率相近的噪声。针对这一缺点，基于小波变换的滤波去噪方法就采用了空间和频率的局部变化，从图像中提取有效的信息，解决了傅立叶变换不能处理的很多问题。薛家祥、刘晓等^[48]就针对传统小波变换不适合处理高频信号的缺点，使用 M 带小波处理焊接中的焊缝图像，为焊缝跟踪提供了良好前提。此外，随着小波变换的发展，其与神经网络等各种图像处理技术的结合，也使这类滤波预处理方法更加有效。

(2) 阈值分割

Lei Zhang 和 Yongkang Xu^[49]提出了一个基于 Ostu 的多阈值分割方法，通过计算灰度值的质心来确定阈值，并将其应用在结构光信息提取中。广东工业大学的林俊等人^[50]就在 OSTU 全局阈值和 Bernasen 局部阈值算法的基础上，设计了一种基于梯度的动态图像分割方法，提高了原始图像对比度不鲜明情况下二值化的效率。哈尔滨工业大学的张华军、蔡春波等^[51]人针对背部焊缝的特征，采用迭代的方法获取分割背景区域、目标区域和热影响区域三部分的阈值，最

终实现三值化。

(3) 边缘检测

数学形态学对焊接过程中熔池特征信息的提取十分有效，华南理工大学的刘晓^[52]就将数学形态学应用到了 MAG 焊的熔池图像分析中去。此外，依赖数学形态学我们不仅可以提取出熔池图像的边缘，还能根据其提取的边缘计算了熔池的最大宽度、半长、面积和后拖脚等几何参数，对实现熔透和成型自动控制方面具有很大的应用价值^[53]。

而近年来主动轮廓模型方法也渐渐将研究重心转移到了焊接领域中，在熔池的边缘提取和焊缝特征提取两个方面获得了一些成果。J. Liu 和 Z. Fan 等^[54]人针对焊接采集到的图像中焊缝区域的边缘不是非常明显，焊缝区域和非焊缝区域的过渡比较平滑，没有边缘检测所需要的节跃等特点，提出的一个线性探测的 snake 参数曲线 (Line-Detected Snake)，以离散的方式最小化能量方程，提取 V 型坡口的四条边界 (线形)。李寿涛、陈浩等^[55]首次在焊缝缺陷检测中运用 CV 主动轮廓模型，其对焊缝图像设定了多个初始轮廓来加快演进速度，此方法准确地将焊缝中的缺陷提取出来。

3.5 本章小结

本章节首先对数字图像技术进行了总体介绍。接着根据图像处理的几个重要流程步骤，分别讨论了灰度化、滤波去噪、二值化、边缘检测和直线拟合等比较经典的算法，介绍了各种算法的定义、模型和主要思想，并分析了常用算法的适用对象、研究现状、优缺点以及在焊接领域中的应用情况等等。

第四章 基于图像处理的 GMAW 焊图像特征提取

焊接领域中，由于焊接环境的复杂性，利用视觉传感系统采集到的图像会存在多方的干扰与噪声，导致有用信息的提取困难。而焊接监控系统要做好质量控制和过程控制这两个方面，首先就需要对传感系统得到的图像进行处理。由此可见，利用图像技术对采集到的图像进行处理，提取出精确的熔池边缘、焊丝、焊缝等特征信息，是焊接监控系统中最为重要的一个步骤，也是监控系统功能实现精确度的保证。

4.1 焊接图像特征

GMAW 焊焊接过程中，由 CCD 摄像头所采集得到的熔池图像中不仅有各种飞溅颗粒形成的点噪声和线状噪声，而且由于存在着弧光和烟尘的干扰，图像的边缘会变得模糊不清，

图 4.1 所示为视觉传感系统采集的 GMAW 打底焊典型图像。从图像上可以看出，焊接图像包含熔池区域、近弧区域、背景区域和一些噪声、弧光干扰。其中熔池为所获取图像上亮度较高的部分，特征比较明显。焊丝位于熔池上方凹陷处，在图像中呈黑色线状，同时其旁边亮度略高于自身的亮度。熔池左右两侧边存在亮度几乎和熔池亮度相同的区域，这两块区域是由于坡口反光而造成的干扰，熔池周围存在着各种飞溅的点状、线状噪声。焊缝位于熔池下方，焊缝左右的亮度偏差极大，两条焊缝中间的区域为前方待焊区域，焊缝周边近弧区也存在毛刺、飞溅，斑点噪声。



图 4.1 GMAW 打底焊典型图像

4.2 基于 OSTU 与直线拟合的焊前校准

焊前校准是开始焊接的第一步，在焊前自动搜索定位，确定焊丝和被焊工件位置，将焊丝、工件自动调整到合适的焊接位置，缩短焊接准备工作时间，相较于人工手动调节，自动校准也提高了准确性与稳定性。

4.2.1 焊前校准功能

焊前校准主要功能是为了调整焊枪和摄像头，将焊枪和工件的坡口调节至屏幕中心位置，

并将焊枪对准坡口中心，示意图如图 4.2，图中，红色十字架为屏幕中心坐标。

本系统中增加焊前校准参数，值设定为 2，即开始校准一次中心，调整后在坡口中心再进行一次微调。此参数可随焊接硬件环境的改变而改变，大大增强了校准的精确度。主要的执行步骤在表 4.1 中详述：

表 4.1 焊前校准伪代码

Procedure1: 焊前校准

- 1、移开滤光片，进行焊前校准准备工作；
- 2、采集图像，显示在人机界面观测区域；
- 3、对采集到的图像进行图像处理，提取焊枪中心轴线、焊丝、坡口边缘的特征信息；
- 4、根据得到的位置信息参数，控制横摆电机调整焊枪、坡口，使其中心在图像中央；
- 5、判定校准参数是否符合设定要求，不符合则转至步骤 2，满足则继续；
- 6、退出焊前校准程序，显示校准成功。

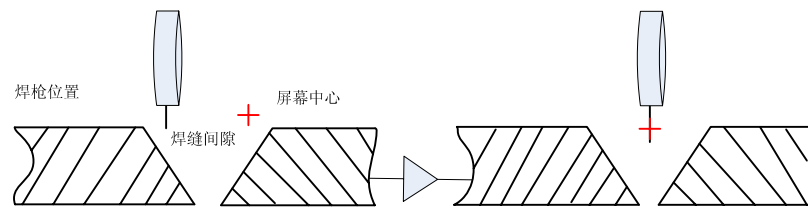


图 4.2 焊前校准位置示意图

4.2.2 基于 OSTU 与直线拟合算法的提出

4.2.2.1 图像处理

图 4.3(a)中显示的是焊接前视觉传感器获取的焊枪与坡口图像，从中我们可以看出，焊接前图像十分清晰，对比度较大，图像中的信息量单一。除了目标对象外，只存在一些背景的背景阴影干扰，而焊枪、坡口这些目标对象的位置固定且特征很明显，因此少量的背景阴影干扰并不能对提取效果产生太大的影响。

由此可见我们并不需要太复杂的图像处理技术，本系统中只需要采用 Ostu 自适应阈值分割方法对进行图像二值分割即可。

4.2.2.2 特征提取

从图像预处理得到二值图像图 4.3(b)中看出，焊枪为图像上方暗区域部分，与背景区域有明显的亮度对比，其宽度较大且固定在一定范围之内；V 型坡口是图像下方的暗区域，坡口边缘是图像像素灰度的阶跃点；焊丝位于坡口与焊枪之间，宽度也在一定范围内并且特征明显。根据这些目标的特征分析，我们给出了确定各个关键位置点的算法，其中去横向为 y 轴，纵向为 x 轴方向。

(1) 确定焊枪中心轴线：在分割后的图像中横向搜索，当搜索到的暗图像区域宽度符合阈值范围，则保存这些边缘点对，将其中心点的集合作为焊枪中心轴线的点的集合。因为焊枪宽度很大，出现干扰的可能性很小，因此将上述集合中的点拟合而成的直线段可以看做是焊枪的中心轴线。

(2) 确定焊丝中心线：搜索算法同焊枪搜索相同，我们可以得到焊丝中心点集合。但是由于焊丝的宽度较小，而且从分割后的图像图 4.3(b)中可以看出焊枪口的位置处会出现一些毛刺，背景中也会有一些阴影干扰。所以我们用上一步中得到的焊枪中心轴线来滤除干扰，即计算所有可能的焊丝中心点到焊枪中心轴线的垂直距离，滤除掉距离超过一定阈值范围的干扰点，再将集合中剩下的点拟合成直线作为焊丝的中心线，即焊丝的位置。

(3) 坡口上/下角点：在分割后的图像中从下往上纵向搜索灰度阶跃点，即亮度变化最大的那些像素点，按照列的顺序保存，得到坡口边缘点集合，在 y 轴方向即横向方向上，依次搜索边缘点中的上拐点和下拐点，即为坡口上/下角点的位置。其中提取坡口右边拐点的算法实现如表 4.2 中所示：

表 4.2 提取坡口拐点伪代码

Procedure2: 提取坡口右角点

- 1、将前 10 列的边缘点 $p_1 \sim p_{10}$ 拟合成初始直线 l_1 ；
- 2、计算点 p_{11} 到上述初始直线的距离，若在阈值范围内，则将其拟合到直线 l_1 中得到新的拟合直线 l_2 ；
- 3、顺序处理接下来的每一个点，计算点到上一步得到的拟合直线的距离；
- 4、判断距离与阈值关系：若小于阈值，则将点拟合入上一个拟合直线，得到新的直线断，转步骤 3，若大于阈值，则转步骤 5；
- 5、得到点 p_n ，其到上一步拟合直线 l_{n-10} 的距离不在阈值范围内， p_n 明显不在边缘垂直线上。取点 p_n 周围的十个点，拟合成直线 l_p ，做为坡口的斜边直线；
- 6、坡口的斜边直线 l_p 与拟合直线 l_{n-10} 的交点为所求拐点，即为坡口右角点的位置。

4.2.3 实验结果分析

为了验证上述算法的提取效果，采用基于 CCD 被动光的 GMAW 管道打底焊系统采集到的焊前图像，在 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 下，内存为 2.00GB 的个人台式计算机上，用 VC++6.0 作为开发工具，对本文所提方法进行了特征提取实验。

本小节给出了利用上述算法得到的实验效果图，在图 4.3 中显示。其中图 4.3(a)的是焊前采集到的图像，明显焊丝不在坡口中心位置，并且存在干扰信息。图 4.3 (b)显示的是经过 Ostu 自动获取阈值、图像分割处理后得到的图像信息，边缘特征十分明显。图 4.3(c)中显示的是利用搜索算法和直线拟合提取到的坡口角点、焊丝、焊枪位置信息，其中红色点表示的是坡口两侧

端点，绿色表示的焊丝位置，蓝色表示的是焊枪中心轴线位置。通过这些信息，我们可以简单的得到焊枪与摄像头需要移动的距离。

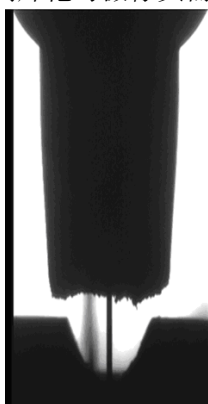


图 4.3(a) 焊丝校准前原图

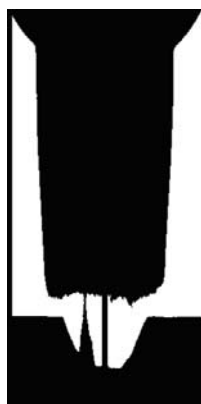


图 4.3(b) 阈值分割效果

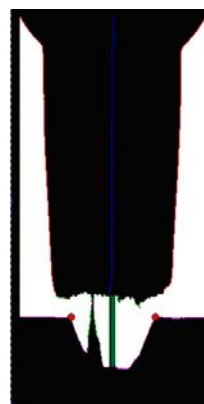


图 4.3(c) 信息提取显示图

图 4.3 焊丝校准效果图

4.3 基于数学形态学与 CV 主动轮廓的熔池边缘提取

熔池为焊接图像中特征最为明显的部分，熔池的大小、形状和几何特征参数，不仅在焊接质量控制中具有着重要的意义，并且为焊缝、焊丝等其他信息的提取提供了良好的前提条件，所以我们需要一个有效的图像处理算法来提取清晰的熔池边缘信息。

4.3.1 熔池边缘提取算法的提出

在分析初始采集到的 GMAW 打底焊典型图像的基础上，我们发现图像中存在这大量的噪声，传统的边缘提取算法明显不能满足系统要求。本文在研究各种图像处理技术的基础上，提出了一种基于数学形态学和主动轮廓模型的熔池边缘提取算法，并初步验证了其有效性。

算法的主要流程包括：输入图像信息、预处理、数学形态学腐蚀、CV 主动轮廓提取熔池边缘。

4.3.2 边缘提取算法原理

4.3.2.1 预处理

为了滤除熔池图像中大部分的干扰，预处理过程主要包括开窗口分析、二值化和熔池区域检测三个部分。

(1) 开窗口分析

在提取质量信息之前，首先要确定需要处理的区域的大小，而不是对光学系统收集到的所有部分都进行处理，那样不仅会占用了计算机的内存，还会影响后续实时处理的速度。根据采集到的初始图像，可以看到熔池区域不仅亮度比较高，而且在光学系统和被焊接的工件均已经固定的情况下，熔池的位置是相对固定在一定区域中的，因此我们仅选择了收集到图像的

200*130 大小的窗口区域作为研究对象 $I(x, y)$ 。

(2) 熔池区域检测

从图像的像素分布情况来看，图中除了亮度较大的熔池区域、亮度很暗的背景区域，就只剩下一些飞溅的噪声。在复杂的焊接环境中，并不是每一幅采集到的图像都是只存在一些简单的飞溅干扰，有的情况下还会出现炸丝、焊漏等焊接缺陷，图 4.4 表示的就是出现焊接缺陷时的熔池图像，很明显图中的熔池边界、焊缝等目标的特征信息与位置已经很难判定，因此我们并不能对每一幅都进行处理，而是要对一些质量差的图像采取抛帧措施。

对图像 $I(x, y)$ 采用一个矩形框框取灰度值大于熔池最高灰度值 90% 的部分，作为熔池的边界，通过 A、B 两点来确定矩形框的位置，其中 A 点坐标为 lRectangle.x 和 lRectangle.y，B 点坐标为 rRectangle.x 和 rRectangle.y，当此矩形框的大小大于某个范围时，可认定此幅图像出现了炸丝或焊漏等情况，干扰严重，不能提取出准确的质量信息。这样，不仅减小了图像处理的代价，提高了系统的处理速度，还能提高图像处理的正确率。

(3) 二值化

二值化处理主要是为了将图像与背景区别开，我们对窗口区域的图像采用 Ostu 自适应阈值分割技术，自动获取的阈值 Z 作为分割阈值，得到二值图像 $B(x, y)$ 。

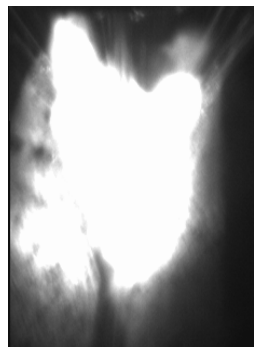


图 4.4(a) 炸丝熔池图像

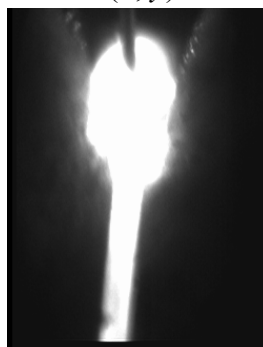


图 4.4(b) 焊漏熔池图像

图 4.4 焊接缺陷图像

4.3.2.2 数学形态学腐蚀

二值化后图像的中亮度较高的部分，除了熔池区域外，还包含了由焊接工件的坡口反光而引起的明显亮度干扰。为了去除坡口反光干扰、飞溅干扰以及边缘周围的边界点，对二值图像 $B(x, y)$ 采用数学形态学腐蚀操作，得到腐蚀后的图像 $M(x, y)$ 。

腐蚀处理时，采用八邻域处理方法，结构算子选择大小为 3*3 的模板，用像素为中心的 8 个邻域的值决定中心点的最终值。其中腐蚀具体算法如表 4.3 中伪码所示，图 4.5(a)表示的是八邻域，*号表示中心点 C 的 8 个邻点，图 4.5(b)表示的是采用的腐蚀算子。

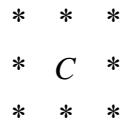


图 4.5(a) 八邻域示意图

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

图 4.5(b) 腐蚀算子

图 4.5 邻域处理腐蚀方法

表 4.3 腐蚀算法伪代码

Procedure3: 腐蚀算法

- 1、将图像亮度存入数组 `errarray[width+3][height+3]`;
- 2、初始化 x、y 方向上的边界。由于结构算子的大小为 3×3 ，为了防止越界，不处理最左边和最上边的两列像素，并将 x 方向上的第一行、第二行和图像 `height+2`、`height+3` 这四行的值设为 255，y 方向上操作相同；
- 3、在剩余区域中利用结构算子进行全方位腐蚀，保留中心点并赋值；
- 4、判断数组中像素点是否均被处理，是则继续，否则转向步骤 3；
- 5、返回腐蚀后的图像。

4.3.2.3 利用 CV 主动轮廓提取熔池边缘

在水平集方法的 CV 主动轮廓模型的基础上，选择合适的初始轮廓形状、大小，提取熔池边缘 $E(x, y)$ 。

(1) 选取合适的初始轮廓：主动轮廓模型是在初始轮廓的基础上，在空间中不断发生形变，使其在图上的投影逐渐逼近真实的熔池边缘，所以选择合适的初始轮廓在一定程度上影响了熔池边缘提取的质量以及处理的速度。

我们将初始轮廓迭代类型分为两种：第一种，初始轮廓在熔池图像的外围，迭代时，从外向内收缩；第二种情况是初始轮廓在熔池图像的内部，迭代时，从内向外扩展。每种情况中，我们还可以选择不同的初始轮廓形状，如圆形、椭圆、六边形等等。

根据本系统获取的图像，可以看出熔池内部点周围的灰度值变化不大，而由于弧光反射以及飞溅干扰等等因素，熔池外部点周围的灰度值变化不尽相同。相同的图像上，从外部向内迭代，较从内向外扩展迭代的次数多，耗时长，更易受到干扰。此外由于圆形有很强的自适应性，适用范围广泛。综合考虑，本文采用内部圆作为迭代的初始轮廓。

(2) 用 CV 模型迭代提取边缘：经过预处理和数学形态学腐蚀的图像 $M(x, y)$ 的边缘已经和真实的边缘轮廓较为接近，再用 CV 主动轮廓方法进行迭代，当能量公式得到最小值时，则满足条件，退出迭代，就能得到边缘信息。

CV 主动轮廓提取边缘算法的思想具体如表 4.4 所述。

表 4.4 边缘提取算法伪代码

Procedure4: CV 主动轮廓边缘提取

- 1、输入熔池图像信息 $M(x, y)$;
- 2、初始化迭代次数 numIter、能量参数、曲率项参数等;
- 3、定义圆心位置, 画出初始轮廓, $f = \sqrt{(x-jc)^2 + (y-ic)^2} - r$ 表示初始轮廓为圆, 其中 r 为半径, x 、 y 为圆心位置;
- 4、曲线演进, 利用函数 EVOLUTION_CV(I, phi, mu, nu, lambda_1, lambda_2, delta_t, epsilon, numIte 进行迭代, 在每一步迭代中利用等式 3.3、3.4、3.5、3.6 计算能量 F ;
- 5、迭代满足条件, 则继续, 否则转向步骤 4;
- 6、输出熔池边缘 $E(x, y)$ 。

4.3.3 实验结果分析

为了验证本文方法的熔池边缘提取效果, 采用基于 CCD 被动光的 GMAW 管道打底焊系统采集焊接熔池图像, 在 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 下, 内存为 2.00GB 的个人台式计算机上, 用 Matlab7.0 作为开发工具, 对本文所提方法进行了边缘提取实验。本小节给出采用不同方法提取熔池边缘的实验结果, 对比它们性能, 主要的指标包括处理时间及最终边缘提取结果。

(1)本文方法实验得到的效果如图 4.6 所示。提取过程为: 图 4.6(a)为矩形框图; 图 4.6(b)为二值化图像; 图 4.6(c)为采用半径为 4 的圆盘结构腐蚀后的图像; 图 4.6(d)为熔池边缘提取结果, 其中参数定义为: 初始轮廓为圆, 定义半径 $r=35$, 迭代次数 numIteration=1。

从图中可以看出, 利用本文的图像处理方法, 可以基本去除坡口的反光干扰和飞溅干扰, 得到较平滑的图像, 利用 CV 模型经过一次迭代完全可以得到清晰的熔池边缘, 为焊缝、焊丝特征提取提供了一个好的前提环境。

(2)不同的初始轮廓的选择得到的效果图如图 4.7 所示。图 4.7(a)初始轮廓为椭圆形, 半径设置为 45, 从内向外扩展, 迭代 10 次, 耗时 0.719000s; 图 4.7 (b)初始轮廓为圆形, 半径设置为 100,, 从外向内收缩, 迭代 100 次, 耗时 7.016000s。综合上一步中的方法, 可见采用圆形作为初始轮廓由内向外扩张的迭代方式比较适合本系统中采集到的图像。

(3)为验证有效性, 将本文方法和没有做过预处理的图像进行对比实验, 如图 4.8 所示。图 4.8(a)中是没有经过预处理的图像利用 CV 主动轮廓提取的边缘; 图 4.8(b)为采用本文算法采用 CV 主动轮廓提取的边缘。由此可见, 相对于单纯的主动轮廓方法而言, 先预处理图像, 再使用主动轮廓, 能够提取出更加清晰的熔池边缘信息, 对后续的图像特征分析做了更好的准备。

(4) 传统边缘提取算法和数学形态学方法均能用在边缘检测上, 为了进一步验证本文方法的有效性, 将本文算法与传统方法和单独采用数学形态方法进行对比实验。所得实验结果如图 4.9 所示。图 4.9 (a)为 Sobel 算子提取出的熔池边缘, 图 4.9 (b)单纯使用数学形态学提取的边缘, 图 4.9(c)为本文算法提取出的熔池边缘。从图中可以看出, 采用 Sobel 算子提取噪声多、污染严

重的焊接熔池图像，容易提取出伪边缘，还会丢失了一部分真实边缘（如图像上半部分），很明显影响了正确率，而仅采用形态学提取熔池边缘时，处理时间大于本文方法，可见前两者并不满足焊接领域的实时、准确的需求。

(5)表 4.5 给出了 Sobel 算子、数学形态学、未预处理的主动轮廓和本文算法对同一幅图像的处理时间。可以看出，本文算法满足实时性的要求。

综上所述，提出新的图像处理算法，可以提取出精确的熔池图像信息，能够给系统后续工作提供良好的前提。



图 4.6(a) 矩形框区域检测 图 4.6(b) 二值化 图 4.6(c) 腐蚀 图 4.6(d) 熔池边缘

图 4.6 本文方法迭代过程

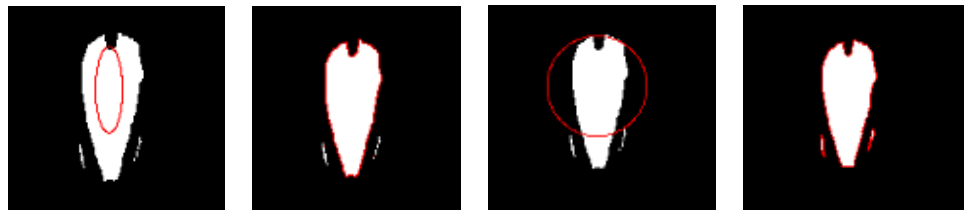


图 4.7 (a)内部椭圆向外扩张

图 4.7 (b)外部圆向内收缩

图 4.7 不同初始轮廓提取结果

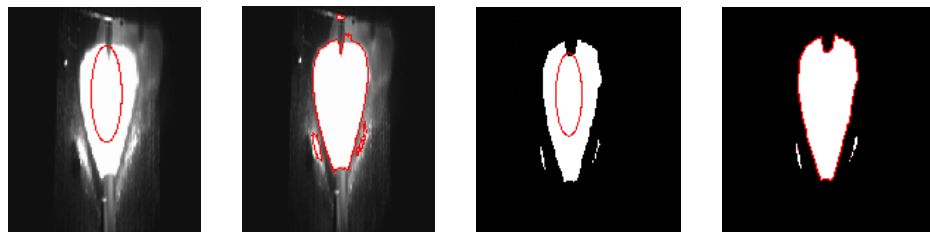


图 4.8(a)未预处理的提取结果 图 4.8(b)经过预处理的提取结果

图 4.8 有无预处理的主动轮廓方法对比



图 4.9(a) sobel 算子

图 4.9 (b) 单纯数学形态学

图 4.9 (c) 本文方法

图 4.9 本文方法与 sobel 算子和数学形态学边缘提取效果比较

表 4.5 时间数据表

提取算法	处理时间
Sobel 算子	0.125000s
未预处理的主动轮廓方法	0.156000s
采用数学形态学提取边缘	0.261000s
本文方法	0.180000s

4.4 基于 Sobel 滤波与 CV 主动轮廓的焊缝与焊丝提取

焊接监控系统中最主要的一个目的就是实现焊缝的自动跟踪并进行实时纠偏，而焊丝、焊缝的位置信息的提取就是自动跟踪系统中最为重要的一个环节，特征信息提取的准确性直接影响着自动跟踪系统的可靠性。

4.4.1 焊缝自动跟踪系统中的图像处理

由于提取位置的主要算法思想是使用图像灰度的加权平均值来确定焊缝与焊丝位置，我们在上一节熔池边缘提取的基础上，结合 CV 主动轮廓和 Sobel 滤波对研究对象 $I(x, y)$ 进行处理，为后续的焊缝、焊丝位置提取做准备。主要过程包括熔池边界确定和 Sobel 滤波两个部分。

(1) 熔池边界确定：提取熔池边缘之后，我们贴合熔池边缘得到一个最小的矩形框。从目标物体的位置特征看出，焊缝位置位于熔池下方，焊丝位置为熔池上方凹陷进去的部分，因此有了这个边缘矩形框，就为我们下一步提取焊缝、焊丝位置缩小了搜索范围，提高了提取的准确度。

(2) Sobel 滤波：对上一步得到的熔池边缘矩形框区域，进行 Sobel 滤波去噪。由于焊缝、焊丝特征明显而且位置几乎为水平，只需要在水平方向上采用 Sobel 滤波处理。即模板与图像做平面卷积，将模板与各个位置像素区域的卷积值，当做相应点的亮度近似梯度值。

滤波模板表示为 $S = \begin{pmatrix} -0.125 & -0.25 & -0.125 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.125 & 0.25 & 0.125 \end{pmatrix}$ ，相应的滤波卷积公式为 $H(x_0, y_0) = \sum_{-1 \leq i \leq 1} \sum_{-1 \leq j \leq 1} I(x_0 + i, y_0 + j) \times S(i, j)$ ，其中 $2 \leq x_0 \leq m, 2 \leq y_0 \leq n$ ，最终图像为 $H(x, y)$ 。

4.4.2 焊丝特征信息提取

图像处理完毕之后，我们可以得到 $H(x, y)$ 中所有像素点的近似梯度值。而从滤波之后的图像中可以看出，焊丝在上方的凹陷部分，坐标位置必定在熔池边缘矩形框上下限之间，其特征明显，在亮度上比周围区域稍显暗。为了检测焊丝的位置，我们设计相应的数据量测模块，利用加权平均的思想提取当前帧的焊丝位置，保证其结果的可信性。

主要思想是：取纵向为 x 轴方向，横向为 y 轴方向。统计熔池边缘框左侧一定范围内的图像的梯度值，取横向上梯度和较大的坐标 y_0, y_1 为焊丝边缘的位置， $\frac{(y_0 + y_1)}{2}$ 作为焊丝的位置。

因为焊丝在图像中呈线状，缝隙不宽，而且焊丝位置受弧光、飞溅影响较小，所以可以保证焊丝提取的准确性。提取算法伪代码如表 4.6 所述。

表 4.6 焊丝特征提取伪代码

Procedure5: 焊丝位置提取

1、在熔池边缘方框左侧 x 坐标[$\text{minRectangle.x}-10, \text{minRectangle.x}+5$]范围，计算每个 y 坐标值的梯度和 $S_{y_0} = \sum_U S(x, y_0)$ ，其中 U 为上述 x 的范围， y_0 是从熔池矩形框的

上边界到下边界。

2、对上述各个 y 坐标的梯度和进行排序，得到 $S_{\max} = \text{Max} \sum_U S(x, y_0)$ 。取梯度和的最大值和次最大值，作为焊丝上下边缘的位置，并用其中心表示焊丝的位置。

3、绘制出出现概率最高的焊丝位置。

4.4.3 焊缝特征信息提取

从图像上看到，焊缝位于熔池的下侧边缘前方，与背景存在一定的亮度偏差，焊缝与熔池相连接的部位为熔池的亮度阶跃区域。与焊丝提取的算法思想类似，我们对熔池下方一定范围内的图像统计其梯度值，取梯度和较大的两个 y 坐标为焊丝边缘的位置，根据概率统计的方法以及对焊缝范围的限制，获得准确的焊缝位置。具体算法如表 4.7 所述。

表 4.7 焊缝特征提取伪代码

Procedure6: 提取上下焊缝位置

1、在熔池矩形框右侧 x 坐标[$\text{maxRectangle.x}, \text{maxRectangle.x}+20$]范围，从右到左搜索梯度值大于阈值 3 的每一个点，记录其 y 坐标在数组 $y\text{DownWeldLine}[]$ 中，此数组中 y 坐标可重复。

2、对数组 $y\text{DownWeldLine}[]$ 中的所有的 y 坐标进行统计，分别将其出现的数值和出现的概率存入数组 $\text{downStatistical_data}[]$ 和 $\text{downStatistical_p}[]$ 中，此数组中的 y 坐标不重复。

3、计算 $\text{downStatistical_data}[]$ 中各个 y 坐标的梯度和，存入数组 $\text{sumGradient}[]$ 中。极值和可表示为： $S_{y_0} = \sum_x S(x, y_0)$ ，其中 S_y 表示 y_0 坐标下的梯度和，x 的范围是 $[\text{maxRectangle.x}, \text{maxRectangle.x}+20]$ ， y_0 为数组 $\text{downStatistical_data}[]$ 中出现的所有值。

4、计算焊缝宽度为上下焊缝的差值，如果差值不在设定的范围[7, 60]之间，则取次大

值为下焊缝的位置，第三大值为上焊缝的位置，依次类推。

5、绘制出出现概率最高是上、下焊缝位置。

4.4.4 实验结果分析

为了验证本文方法的焊缝、焊丝提取效果，采用基于 CCD 被动光的 GMAW 管道打底焊系统采集焊接熔池图像，在 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 下，内存为 2.00GB 的个人台式计算机上，用 VC++6.0 作为开发工具，对本文所提方法进行了焊缝提取实验。本小节给出了实验结果，对比它们性能，主要的指标包括最终提取结果和跟踪精度。

(1) 图 4.10 为显示在原图上的焊缝、焊丝提取的效果图。其中，图 4.10(a)为对目标采用 Sobel 滤波后的图像，焊缝、焊丝提取结果如图 4.10(b)所示，焊丝中心位置用一条白线标注，上下焊缝提取结果在下方用两条白线标注。

(2) 为了进一步验证本节提取算法的有效性，我们给出了一个帧序列，共 15 幅图像的提取效果，如图 4.11 所示，可见本文算法能够成功的提取焊接过程图像上的特征信息。

(3) 为了计算提取算法的精度，本节采用 2010 年 7 月 28 号采集到的图像，以 150 幅为基数，统计图像处理、焊缝、焊丝位置提取的成功率、抛帧率和误判率。表 4.8 给出了结果统计。其中 T1：焊接质量不好的图像；T2：含有熄弧图像（20 幅左右）；T3：正常焊接。由此表可以看出新的图像处理与特征提取算法，应用在管道打底焊监控系统中，在一定抛帧比例下，对于焊缝等特征识别精度 90%左右；能够给执行机构提供正确的焊接图像信息。

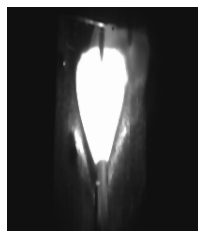


图 4.10(a) 滤波

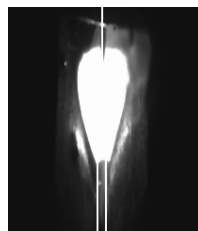
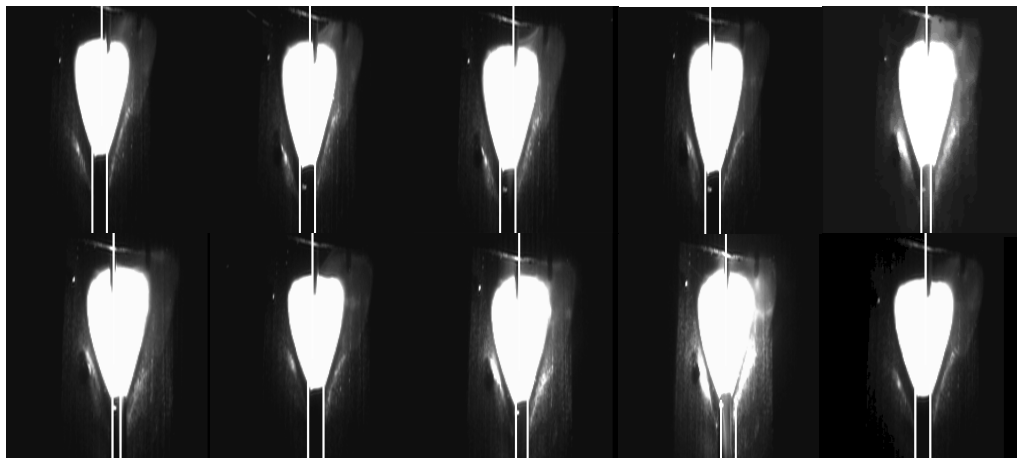


图 4.10(b) 焊缝、焊丝提取图

图 4.10 特征信息提取效果图



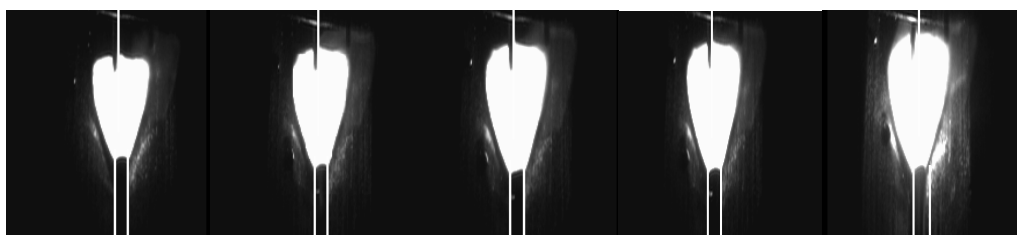


图 4.11 序列焊缝与及焊丝提取结果

表 4.8 图像处理精度表

参数：20 帧为处理单位

	T1	T2	T3
成功率	149	149	149
正确率	43	82	115
抛帧率	87	57	23

4.5 本章小结

本章节论述了图像处理技术在焊接图像特征提取过程中的应用。在分析视觉传感系统获得的图像的基础上，根据焊接前和焊接过程中，熔池、焊缝、焊丝等目标的不同特征，提出了适合 GMAW 焊的焊前校准算法、熔池边缘提取算法和焊缝、焊丝提取算法，并采用不同的开发工具验证其有效性。结果表明，这些方法快速有效，能够精确的提取目标特征。

本章的工作不仅在焊接过程的质量控制方面具有一定的研究意义，还为后续 GMAW 焊监控系统的过程控制提供了准确的输入信息，奠定了良好的基础。

第五章 焊缝跟踪过程控制分析

通常，对于焊缝自动跟踪系统的设计，通常会遇到两个关键问题：一是在复杂的焊接工艺条件下，如何准确获取焊缝、焊丝的位置信息；二是在得到偏差信息后，如何焊缝间隙大小等外在因素进行实时控制。第一个问题我们在第四章中给出了论述，而本章就设计了一个基于 PID 控制的方法来实现焊缝自动跟踪过程。

5.1 焊缝自动跟踪系统

5.1.1 焊缝自动跟踪系统概述

焊缝自动跟踪系统是焊接监控系统中重要的组成部分，其工作原理是，在图像处理的基础上，IPC 结合纠偏算法得出焊缝的偏差及偏差变化趋势信息，并将其传送给控制模块，采用相应的控制策略，向执行机构发出命令，带动焊枪进行运动，以达到保证焊丝位置一直处于焊缝间隙一定范围要求，达到实时纠偏的目的。

纠偏控制过程根据焊缝间隙的大小分为无横摆纠偏、有横摆纠偏和自动横摆纠偏三个部分。其中，无横摆纠偏是针对焊缝间隙 $\leq 2\text{mm}$ 的工件，当工件的间隙小的时候，焊接过程中焊枪不需要摆动，自动跟踪过程中始终保持焊枪在焊缝中心位置；固定横摆是针对间隙 $>2\text{mm}$ 并且间隙变化较小的工件，焊接的时候焊枪需要加入固定横摆在坡口附近摆动焊接，防止焊漏等焊接缺陷情况出现；自动调整横摆是针对间隙 $>2\text{mm}$ 并且间隙变化较大的工件，焊接过程中需要根据间隙的变化，相应的调整焊枪的横摆宽度进行焊接。

焊缝自动跟踪流程图如图 5.1 所示。

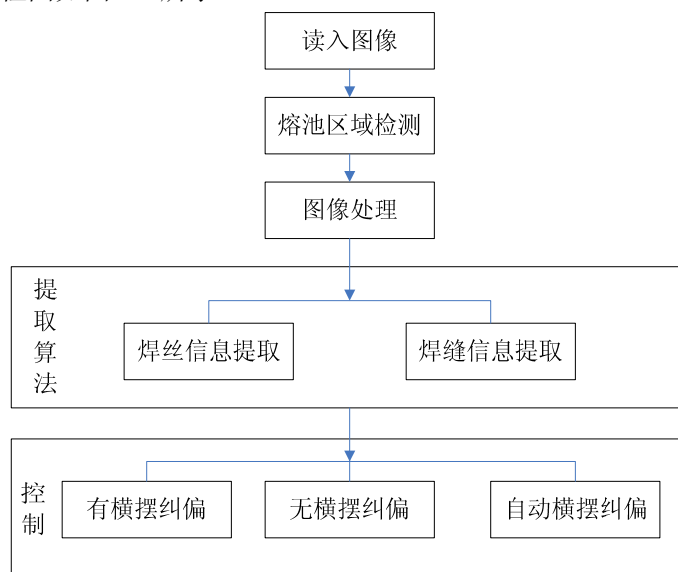


图 5.1 焊缝自动跟踪流程图

5.2.2 纠偏算法

纠偏过程中，IPC 均是对采集到的当前帧进行图像处理，计算焊缝与焊丝的偏差值来控制执行就够进行纠偏。但是由于初始图像质量受外界环境影响时好时坏，而且焊缝、焊丝提取算法的正确率并不是 100%，所以为了保证系统的稳定性，我们采用链表结构，将 20 幅图像队列作为一个整体，取其焊缝位置的加权平均值作为当前帧的焊缝位置，同时增加纠偏控制量 N，在焊缝偏差满足纠偏条件情况下，每 N 幅图像纠偏一次。这样不仅减少了纠偏次数，防止步进电机产生振荡，同时还降低了自动跟踪系统对图像处理精确度的依赖性，大大提高了其独立性与稳定性。

其中加权平均思想公式有两种表达方式，等式 5.1 应用在计算前 20 幅图像焊缝均值中，等式 5.2 应用在 20 幅之后的图像焊缝提取中，偏差量为焊缝中心与焊丝的差值，如等式 5.3 所示，纠偏补偿量如等式 5.4 所示，

$$\begin{cases} \text{avedownweld} = \sum_{i=1}^{\text{numnew}} \text{downweldline} / \text{numnew} \\ \text{aveupweld} = \sum_{i=1}^{\text{numnew}} \text{upweldline} / \text{numnew} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} \text{avedownweld} = \text{avedownweld} + \text{downweldline} / 2 \\ \text{aveupweld} = \text{aveupweld} + \text{upweldline} / 2 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\text{tempGap} = \text{abs}(m_WeldWire - (\text{avedownweld} + \text{aveupweld}) / 2) \quad (5.3)$$

$$\begin{cases} \text{avedownweld} += \text{tempGap} \\ \text{aveupweld} += \text{tempGap} \end{cases} \quad (5.4)$$

5.2.2.1 无横摆纠偏

在无横摆纠偏过程中，启动焊接之后，焊枪就一直在坡口中心位置进行焊接，同时 IPC 进行采集、处理、显示图像的工作，无偏差时焊丝与焊缝中心的差值应为 0，当此偏差值大于一定范围且控制纠偏量等于设定值时进行纠偏操作。整个过程中焊接与纠偏是同时进行的。无横摆纠偏算法伪代码如表 5.1 所示。

表 5.1 无横摆纠偏算法伪代码

Procedure7: 无横摆纠偏算法

- 1、启动焊接；
- 2、采集图像，提取当前帧焊丝、焊缝的位置；
- 3、图像数量是否满 20 幅，是则继续，否则转向 2，继续采集；
- 4、计算前 20 幅图像焊缝、焊丝位置的加权平均值，如等式 5.1 所示；
- 5、采集图像，提取当前帧焊丝、焊缝位置，利用等式 5.2 得出的均值作为当前帧的焊缝、焊丝位置，并将其显示在观测区域；

- 6、用等式 5.3 计算当前帧焊缝中心和焊丝位置的偏差；
- 7、满足纠偏条件，控制横摆微调电机，纠正偏差，否则转向 5；
- 8、纠正偏差后，由于坐标系的移动，用等式 5.4 对焊缝、焊丝的均值进行像素补偿；
- 9、焊接过程是否结束，否则转向 5，是则关闭横摆电机，退出程序。

5.2.2.2 固定横摆纠偏

在固定横摆纠偏过程中，启动焊接之后，焊枪由坡口中心位置加减速至一边界，在边缘停留时间内，IPC 以帧为单位，采集、处理、显示图像，无偏差时，焊丝与焊缝中心的差值应该等于摆宽，当此偏差大于一定范围且纠偏控制量等于设定值时执行纠偏操作；边缘停留时间结束时，焊枪从边缘加减速至另一边缘，循环往复，直至停止纠偏控制。固定横摆纠偏算法伪代码如表 5.2 所示。

表 5.2 固定横摆纠偏算法伪代码

Procedure7: 无横摆纠偏算法

- 1、启动焊接；
- 2、焊枪运动到边缘，进入摆停时间；
- 3、IPC 开始采集处理图像；
- 3、纠偏过程如同无横摆纠偏；
- 4、摆停时间是否结束，是则继续，否则转向 3；
- 5、焊接过程是否结束，否则继续，是则关闭横摆电机，退出程序。
- 6、焊枪加减速至另一边缘，转向 3；

5.2.2.3 自动横摆纠偏

在自动横摆纠偏过程中，启动焊接之后，焊枪由坡口中心位置加减速至一边界，在边缘停留时间内，IPC 以帧为单位，采集、处理、显示图像，满足纠偏条件时执行纠偏操作；边缘停留时间结束时，焊枪从边缘加减速至另一边缘，循环往复，直至停止纠偏控制。其主要过程同固定横摆纠偏类似，唯一不同点是在焊枪加速至中间时，根据焊缝宽度来改变摆宽大小，具体表示为计算焊缝宽度与当前的摆宽的差值，此差值代表了间隙渐变的情况，当其在设定范围内，则采用当前坡口宽度作为横摆宽度。固定横摆纠偏算法伪代码如表 5.3 所示。

表 5.3 自动横摆纠偏算法伪代码

Procedure7: 无横摆纠偏算法

- 1、启动焊接；
- 2、焊枪运动到边缘，进入摆停时间；
- 3、IPC 开始采集处理图像；
- 3、纠偏过程如同无横摆纠偏；

- 4、摆停时间是否结束，是则继续，否则转向 3；
- 5、加速至中间，计算焊缝宽度与摆宽的差值，判定是否需要改变摆宽；
- 6、焊接过程是否结束，否则继续，是则关闭横摆电机，退出程序。
- 7、焊枪加减速至另一边缘，转向 3；

5.2 基于 PID 实时控制策略

从上一章节中我们得到了 IPC 计算出的纠偏值，控制模块将其作为输入量，采用相应的控制策略来操纵机器人进行焊接，我们在分析本系统纠偏过程特点的基础上，采用了 PID 线性控制器来实现实时纠偏过程。

5.2.1 PID 控制器

PID (Proportional Integral Differential) 控制器一种最常用的经典控制方法，是比例、积分、微分的简称。其由比例单元 (P)、积分单元 (I) 和微分单元 (D) 组成，输入 $e(t)$ 与输出 $u(t)$ 关系可以表示为： $u = k_p e + k_i \int e dt + k_d e$ ，其中 k_p 为比例参数， k_i 为积分参数， k_d 为微分参数。

PID 控制器具有原理简单，使用方便等优点，被应用在工业控制的很多领域中。它的设计难点不是编程，而是控制器中参数的确定。

5.2.2 实时控制

实时控制(Concurrent Control)是指以直接监督的工作方式，在工作进行中便执行控制，同时修正行为。在焊接领域中，系统误差获取是始终滞后于系统纠偏执行的，大多数情况下，人们习惯采用当前时刻提取的偏差作为下一时刻的纠正偏差量，但是这种方法存在明显的缺陷，导致了跟踪精度的下降。在这样的背景下预测控制的思想应运而生，其特点是利用参数或非参数模型建模，得出适合工业现场的复杂模型，并且采用局部优化策略，对优化窗口不断滚动，将实际输出和模型的理想输出不断比较并反馈校正，以便得到较好的跟踪效果，它的模型如图 5.2 所示。

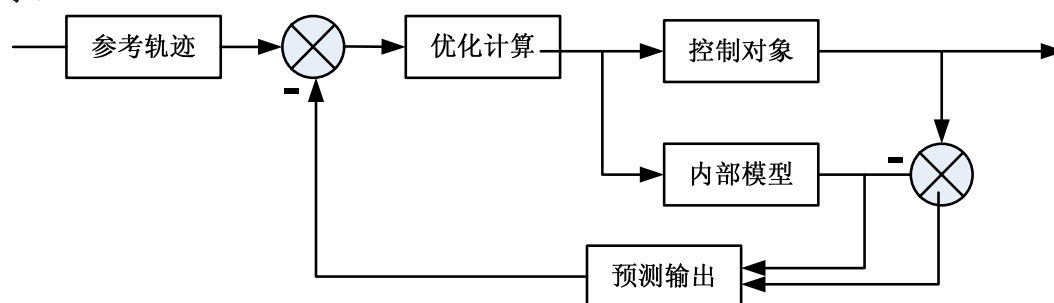


图 5.2 预测控制模型

5.2.3 控制策略

对本系统中的三类纠偏控制，我们根据其原理设置了不同的控制策略，下面主要介绍无横摆纠偏和有横摆纠偏两个部分。

(1) 无横摆纠偏：本文采用基于 PID 控制器的预测控制策略。

我们在进一步分析控制系统的基础上，从上一小节的介绍中可以看出无横摆纠偏控制过程中不存在摆停时间，当系统获取了当前帧的偏差量时，焊枪早已移动到下一个位置。针对这个问题，我们重新设计系统控制结构，在原有的传统 PID 控制结构基础上增加误差预测项及误差预测偏差项，其中 PID 控制器不考虑微分的影响。新的控制结构的离散表达式为：
$$u(k) = k_p(e(k-1) - e(k-2)) + k_i e(k-1) + k_{est}(D_{k-1} - D_{k-2}) + k_{err}(D_{k-1} - 2D_{k-2} + D_{k-3})$$
，其中 $u(k)$ 为纠偏项， $e(k-1)$ 为前一帧图像提取的误差， k_p 为比例参数， k_i 为积分参数， $k_{est}(D_{k-1} - D_{k-2})$ 为预测误差项， $k_{err}(D_{k-1} - 2D_{k-2} + D_{k-3})$ 为预测误差偏差项。

(2) 有横摆纠偏：从有横摆纠偏控制原理中我们可以看到，焊接过程中，焊枪在边缘停留一段时间用于采集图像，在摆停期间纠正焊枪，在纠正完毕、摆停结束后才向反方向运动，实现下个周期的摆动过程。整个过程中，明显不存在无横摆纠偏中的纠偏滞后的问题，故控制过程相对简单，只需采用基本的控制方法就能满足要求。

5.2.4 仿真实验结果分析

为了确定本文控制方法的参数，在 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU、内存为 2.00GB 的个人台式计算机上，将仿真工具中的轨迹步长、幅度模拟成和现实环境相似，在保持当前轨迹参数不变的情况下，从 PID 控制角度对上述过程进行了仿真，此时采用纯积分控制方式。其中焊枪主轴为纵向坐标，曲线与 X 轴的距离为误差。

(1) 传统 PID 仿真效果图如图 5.3 所示。其中焊缝轨迹方程为 $y(n) = K_l \cdot n$ ， K_l 为直线的斜率系数，参数 K_i 影响调节时间， K_p 影响系统跟踪的静态误差，其超过 1 时曲线会出现震荡现象，减小时，静态误差增大。图 5.3(a) 表示的是焊枪实际轨迹与焊缝误差的仿真图，图 5.3(b) 是 $K_p = 0.8$ 、 $K_i = 0.2$ 的仿真图，可见不加预测分析时，不管如何调节参数，曲线均存在静态误差。

(2) PID 预测控制器仿真效果图如图 5.4 所示。现实焊接环境中焊接管件是一条封闭的曲线，为了符合实际情况，我们使用图 5.4(a) 中显示的正弦曲线来代表实际焊缝轨迹进行误差仿真实验。此时设焊缝最大偏离误差为 $\pm 20\text{mm}$ ，一个图像采样间隔管件旋转角度为 3° ，在上一步基础上保持比例及积分参数不变，选择合适的预测项参数 K_{est} 和 K_{err} 减小稳态误差。图 5.4(b) 显示了 $K_{est} = 1$ 和 $K_{err} = 2$ 的效果图，可以看到曲线几乎与水平轴重合，误差最小。同时由于仿真过程中，轨迹是已知的，相应得到的偏差也是已知的，所以根据正确的偏差得到的曲线是理想

的。但现实环境中，图像处理得到的焊缝、焊丝位置可能存在一定误差，考虑到这个因素，我们最后在检测的基础上增加噪声。图 5.4(c)中表示了对图 5.4(b)增加高斯噪声后的误差曲线，可见在增加了噪声后，系统跟踪的稳定性和精度仍能满足需求。

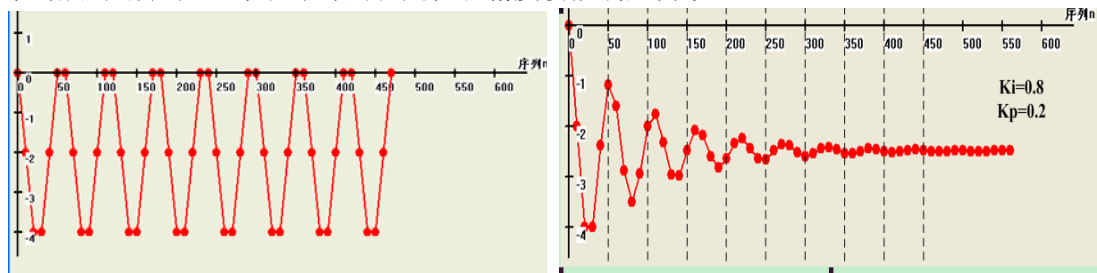


图 5.3(a) 焊枪实际轨迹图

图 5.3 (b) $K_p = 0.8, K_i = 0.2$

图 5.3 不加预测控制仿真图

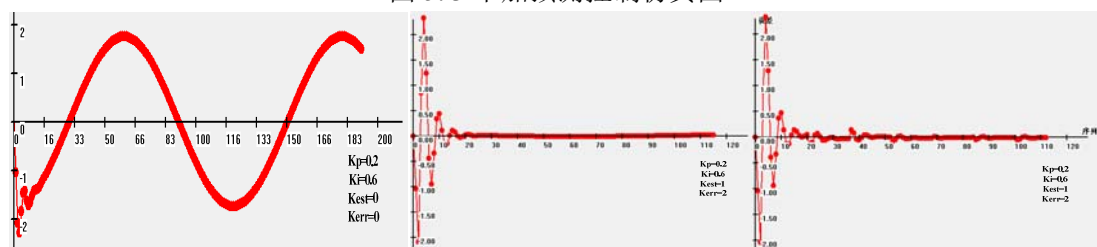


图 5.4(a)正弦曲线

图 5.4(b) $K_{est} = 1, K_{err} = 2$

图 5.4(c) 加高斯噪声仿真图

图 5.4 预测控制仿真图

5.3 步进电机控制

焊接过程中，控制机构均是通过控制步进电机来操纵执行机构完成操作的。步进电机的功效主要有两个部分，一个是在纠偏过程中控制焊枪在焊缝中心位置运动，另一个是在工件间隙大的情况下控制焊枪的摆动来完成焊接过程。

焊枪摆动过程中为了减小冲击，系统在步进电机基本控制曲线中加入匀速这一环节，采用加速、匀速和减速三个过程的加减速控制方法。而纠偏控制部分主要是根据算法得到的距离量，根据已知脉冲当量距离，工控机发出相应的脉冲数，来控制步进电机的移动。每个脉冲的当量距离由步进驱动的精度决定，本系统中采用的步进电机螺距恒定，所以电机每转动一圈所移动的距离均相同，系统核心处理器一个周期内发送 400 个脉冲，步进电机就转动一圈，相应的电机滑盖水平移动 4mm。因此可以计算出系统每要求步进电机移动 1mm，工控机就必须发出 100 个脉冲。

5.4 本章小结

本章节首先介绍了不同坡口间隙下焊缝跟踪过程中纠偏补偿机制的原理，设计了一种基于加权平均思想的纠偏算法。在研究 PID 控制器原理的基础上，根据工业控制的特点和本系统的实际需求，提出了一种基于 PID 控制器的实时控制方法，最后在 VC 仿真工具中模拟真实环境，

确定了控制参数，完成了控制器的设计。

这种控制方法在固定焊接工艺的条件下，能够对焊枪的横摆宽度和水平位移进行有效控制，提高了焊缝、焊丝的提取精度，实现了焊缝实时跟踪和横摆自适应的过程，满足焊接监控系统的功能需求。

第六章 基于被动光的 GMAW 管道打底焊监控系统软件

针对工业控制软件特点，设计并实现基于被动光的 GMAW 管道打底焊智能监控系统。提供实时、稳定、可自定义的人机接口界面，将焊接工艺参数、焊前校准等功能集成实现，在结合图像实时处理和自动跟踪控制的基础上，实现了高质量的管道打底焊的自动焊接。该系统的开发填补了国内此领域中的空白，具有重要的理论意义和应用前景。

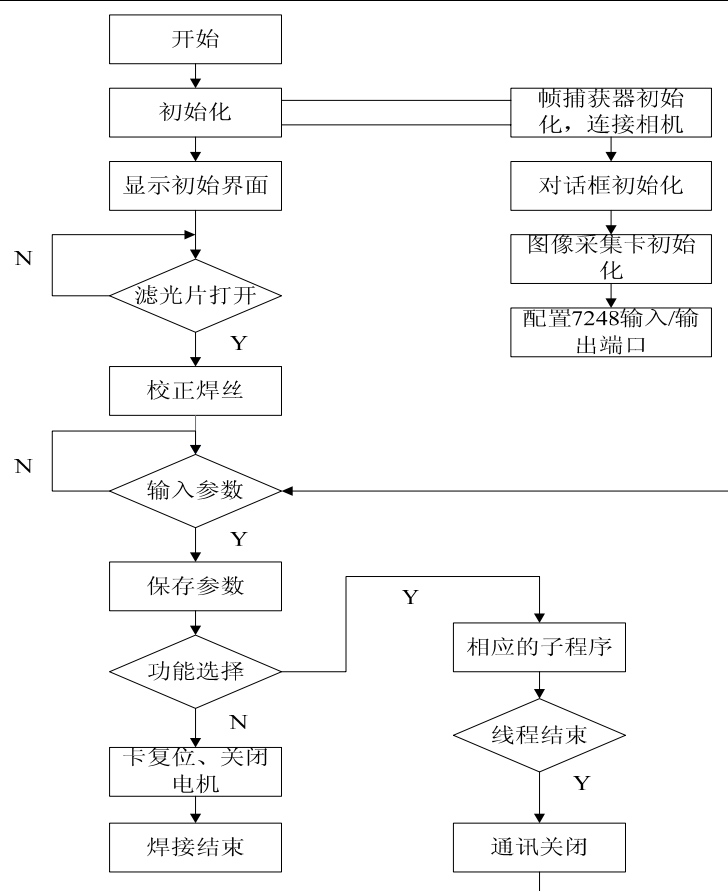
6.1 系统软件功能概述

6.1.1 系统界面

监控系统软件界面如图 6.1 所示。主程序功能流程图如图 6.2 所示。



图 6.1 监控软件界面



6.1.2 系统功能

焊接监控系统软件界面分为 5 个部分，每部分的详细描述为：

(1) 焊接图像显示区域：作为显示窗口。焊前校准时显示焊前拍摄到的图像；焊接过程中实时显示熔池图像，并将经过图像处理算法后得到的特征信息标示在图片中，在此窗口中显示，方便焊接人员实时监控焊接质量。

(2) 参数设置：调整相应的管道打底焊焊接工艺参数和焊接管件参数，包括横摆速度、横摆宽度、边缘停留时间、衰减时间、间隙范围，最后使用“修改参数”按钮进行信息的确认保存。系统软件根据这些参数进行焊接，这样不仅降低了对焊接操作人员的技术要求，还提高了焊接精度和生产率，使焊接过程的自动化程度更高。一般参数选取为：焊接速度 25（默认单位 mm/min， $m_Speed = 25$ ），横摆宽度 4（默认单位 mm， $m_Offset = 4.0$ ），焊丝边缘停留时间 4（默认单位 ms， $m_StopTime = 0.3$ ），衰减时间 3（默认单位 ms， $m_AttenuationTime = 3$ ），工件焊缝间隙范围为 1~6（默认单位 mm， $m_MinGap = 1$ ， $m_MaxGap = 6$ ）。

(3) 焊丝校正：焊接前可以通过界面上的“校正焊丝”按钮，自动校准图像位置使其显示在界面中心位置，焊枪、坡口信息也显示在界面中心，并且焊枪正对坡口中心。“焊枪向左”，“焊

枪向右”，“微调向左”，“微调向右”按钮是辅助自动焊接前后的一些基本手动操作，操作人员可以通过这些按钮来进行校准的人工调整。其中“校正焊丝”在第三章中详述了其实现方法，“焊枪向左”、“焊枪向右”、“微调向左”、“微调向右”是通过控制微调电机来控制焊枪和焊枪位姿调整机构的移动速度和距离，每点击一次移动的距离为 0.5mm（MiniAdjustOffset=0.5，offset=0.5），焊枪以速度 10mm/min 速度移动（speed=10）。

(4) 视觉监视：“图像观测”对焊接过程中熔池图像进行实时监控，在左边的焊接图像显示区域给出熔池图像，为焊接操作者提供辅助信息，焊接操作者可根据显示的熔池图像判断是否焊偏等等焊接缺陷，并自行调整。“采集图像”按钮是用来采集焊接过程中的熔池图像，并将 bmp 图像文件保存在 Image 文件夹中。下方的纠偏控制部分主要分为无横摆纠偏、有横摆纠偏和自动横摆纠偏，具体过程在第五章中给出了详述。“启动视觉纠偏”是指在纠偏的同时记录相关数据信息。

6.1.3 系统主要功能模块

系统的主要功能模块分为：校正焊丝、图像处理、无横摆纠偏、有横摆纠偏、自动横摆纠偏五个部分。表 6.1 至表 6.5 给出了这五个功能模块的详述。

表 6.1 焊丝校正模块

模块名称	校正焊丝
模块代码名称	void CWELDCONTROLDlg::OnAdjust()
启动条件	滤光片打开，焊枪调至焊接位置
输入	图像采集显示，十字划线，自动校正
功能	将焊枪及坡口图像调至屏幕中心，并将焊丝对准坡口中间位置，做好焊接起弧准备
性能	图像显示及划线正确，横摆微调电机响应满足要求
输出	正确焊接位置

表 6.2 图像处理模块

模块名称	熔池图像处理模块
模块代码名称	bool ProcessImage(MyImage *src, MyImage *dst)
启动条件	焊接启动正常，图像获取正常
输入	图像，图像算法，区域限制阈值
功能	将每一帧图像，利用图像处理算法进行焊丝和焊缝位置信息提取，得到焊丝和焊缝位置信息的值
性能	焊丝和焊缝位置信息提取正确率与图像质量和算法有关，提取

	正确率在 90%左右
输出	焊丝和焊缝位置信息实际值

表 6.3 无横摆纠偏模块

模块名称	无横摆纠偏模块
模块代码名称	void CWELDCONTROLDlg::OnAutoAdjust()
启动条件	图像采集和处理正常
输入	焊丝和焊缝位置信息，偏差信息，专家参数数据库
功能	根据焊丝和焊缝位置信息计算位置偏差信息，利用专家参数数据库设置微调速度，将位置信息传递给执行机构完成纠偏
性能	实现焊接过程中自动纠偏，使得焊接后能达到较好的焊接质量
输出	位置偏差信息

表 6.4 有横摆纠偏模块

模块名称	有横摆纠偏模块
模块代码名称	void CWELDCONTROLDlg::OnAutoAdjustSwing()
启动条件	图像采集和处理正常
输入	焊丝和焊缝位置信息，偏差信息，专家焊接参数
功能	根据焊丝和焊缝位置信息计算位置偏差信息，利用专家焊接参数设置焊接参数（横摆宽度，横摆速度，微调速度），将位置信息传递给执行机构完成纠偏
性能	实现焊接过程中不调整横摆宽度和进行自动纠偏，使得焊接后能达到较好的焊接质量
输出	位置偏差信息

表 6.5 自动横摆纠偏模块

模块名称	自动横摆纠偏模块
模块代码名称	void CWELDCONTROLDlg::OnAutoSwing()
启动条件	图像采集和处理正常
输入	焊丝和焊缝位置信息，偏差信息，专家焊接参数
功能	根据焊丝和焊缝位置信息计算位置偏差信息，利用专家焊接参数设置焊接参数（横摆宽度，横摆速度，微调速度），将位置信息传递给执行机构完成纠偏
性能	实现焊接过程中自动调整横摆宽度和进行自动纠偏，使得焊接后能达到较好的焊接质量

输出	位置偏差信息
----	--------

6.2 系统的软件实现

6.2.1 系统开发工具

根据系统整体要求，采用 Microsoft Windows XP Professional 作为操作系统，因为其整体性能稳定，基本满足实验要求软件环境。Visual C++6.0 作为软件开发工具。

6.2.2 系统实现的关键技术

(1) 采用 MFC 编程方式实现。

(2) 软件结构设计

采用链表形式的数据结构作为基本的数据结构。链表长度为 20，每一幅图作为一个节点。在纠偏控制环节中，每 20 幅图像作为一个处理单位，其处理流程中的程序结构如图 6.3 所示。

```

for( )
{
    while(1) //前 20 幅图像
    {
        .....
        for( )
        {
            //处理前 20 幅图像
        }
        .....
    }
    .....
    ..... //后面进一幅处理一幅
}
    
```

图 6.3 软件结构

(3) VC 多线程处理技术。

从 6.1.3 节中我们看到软件实现代码中的主要功能模块：校正焊丝、无横摆纠偏、有横摆纠偏、自动横摆纠偏。运行纠偏过程时，图像采集、处理部分也在同时运行，从而导致了界面不流畅，刷新出现延时等等现象。因此为解决这个问题，我们将采集图像模块和上述功能模块分别写一个线程函数。采用了 CreateThread 函数创建线程函数，如无横摆纠偏主程序中的创建线

程函数是 `HANDLE hThread_nhb=CreateThread(NULL, 0, TAutoAdjust, this, 0, NULL)`，同时无横摆纠偏的线程函数为 `DWORD WINAPI CWELDCONTROLDlg::TAutoAdjust(LPVOID lpParam)`。

虽然建立了线程函数后，效果有了很大的改善，但是每个线程之间也会存在抢占资源的情况，某些时候就会出现内存报错等问题，导致系统稳定性下降。例如纠偏控制过程中，采集图像线程常会与纠偏线程相冲突，相应的我们就可以直观看到步进电机在纠偏过程中出现衰减不正常的情形。针对这个问题，我们采用了信号量互斥的方法，即在上一段中介绍的软件结构的 *1 与 *2 处分别添加 `WaitForSingleObject(this_mutex, INFINITE)` 和 `ReleaseMutex(this_mutex)`，通过让各个线程获取信号后才能运行的方法来解决各线程之间抢占资源的问题。

(4) 动态链接库：由于图像的基本处理程序和横摆、弧长电机的控制，系统软件的每一个功能模块都需要用到，因此为了节省内存、提高代码可复用性，将这两个部分的基本代码做成动态链接库（Dynamic Link Library）形式。一为了共享资源，二为了增加各模块的独立性，减小依赖度。主程序采用 `_declspec(dllexport) Type FunctionName(Type Parameter)` 来调用动态链接库函数。

6.3 系统软件的测试应用

该软件正确实现了基于被动光的 GMAW 管道打底焊监控系统，实现了自动化焊接，提供了人机界面。为了验证该监控系统的有效性，我们在从以下几个步骤来进行测试与实验：

第一步，首先验证焊前校准功能是否能实现。按下“焊前校准”按钮，可以在显示区域看到关键点的信息，并调整电机改变位移，具体效果在第三章中实现。

第二步，测试离线图像处理程序，在一定抛帧比例下，使得图像处理算法精度提高至 90% 以上，精度对比在第四章中给出了描述。

第三步，测试在线焊缝跟踪系统。分别测试无横摆纠偏、有横摆纠偏和自动横摆纠偏。

经过上述分析，我们在满足管道打底焊接工艺及智能监控技术的验证系统上，进行了现场跟踪实验，以验证本系统的实际应用效果。对管径为 $\phi 300 \times 10\text{mm}$ 的 20G 进行了一组实验，焊接电流 120A，焊接电压 20.8V，送丝速度 5.6m/min，横摆速度 1800mm/min，焊丝边缘停留时间 0.4s，管道坡口角度 35° ，保护气体为 80%-82% 氩气和 20%-18% 二氧化碳，焊丝直径为 1mm，图 6.4 中的几组图像显示焊缝间隙从 2mm 到 6mm 打底焊成型前后的对比。

从结果上看，各位置焊道敷设均匀，表面成形平整，跟踪偏差小；填充焊道焊枪摆动纹路均匀，填充饱满，两侧无咬边现象。焊缝具有较好的跟踪精度，同时跟踪系统在埋弧焊条件下具有较强的抗干扰能力以及良好的适应能力。根据焊接过程中存储的文件信息，误差在 $\pm 0.4\text{mm}$ 以内，纠偏精度 0.5mm 内。由此可以看出，本焊缝跟踪系统具有平滑、稳定的特点，能够满足监控系统需求，能够很好的应用于实际生产中。



图 6.4(a) 间隙为 5mm 管管 MIG 打底焊成型前后对比图



图 6.4(b) 间隙为 6mm 的管管 MIG 打底焊成型前后对比图



图 6.4(c) 间隙为 2~3mm 的管管 MIG 打底焊成型前后对比图



图 6.4(d) 间隙 2~6mm 的管管 MIG 打底焊成型前后对比图

图 6.4 管 MIG 打底焊成型前后对比

6.4 本章小结

本章主要对 GMAW 管道打底焊监控系统软件平台进行了详细的介绍。

(1) 介绍了基于 Windows 平台，具有 VC++6.0 开发特点的软件界面、主流程图、主要功能函数模块的实现过程。

(2) 进而介绍了软件开发工具，给出了软件设计中的关键技术和难点。

(3) 最后描述了系统的应用与测试，在满足试验条件的焊接设备上，通过对一组管焊试件的焊接实验，展示了该软件平台各项功能的完善性，可见该系统软件执行效率高，应用稳定可靠。

第七章 总结和展望

7.1 论文的主要工作及贡献

本文研究设计了一套完整的基于被动光的 GMAW 管道打底焊监控系统，是计算机在焊接设备自动化控制领域的一项重要应用。该系统由图像处理系统、PLC 控制系统和人机界面系统组成，利用 CCD 相机和复合滤光技术组成的光学系统，实时获取焊接图像，采用熔池检测、焊丝提取和焊缝跟踪算法，实时处理焊接图像，控制横摆电机进行焊接。并根据获取的焊缝宽度与焊丝位置，计算中心偏差，控制微调电机，完成焊丝中心纠偏，最终完成焊接过程。

论文的主要工作包括：

(1) 研究焊接自动化技术的发展历程以及焊接监控系统国内外的研究现状，在上述背景下，分析了基于被动光的 GMAW 管道打底焊监控系统的研究意义和整体结构，根据现实的实际需求，给出了设计思路。

(2) 研究光学原理，利用光学成像原理和滤光片的作用，结合专家数据库的焊接工艺参数，建立了一个不借助于辅助光源的视觉传感系统，获得尽量稳定清晰的焊接图像，为焊接质量控制提供了良好的前提条件。

(3) 分别对监控系统的三大功能模块，焊前校准系统，图像处理系统和焊缝自动跟踪系统设计了相应的算法思想。具体表述为：设计了一种基于 Ostu 与直线拟合的校准算法，设计并实现了一种结合数学形态学和主动轮廓模型的熔池边缘提取算法，在此基础上，根据采集到的图像特点，利用 Sobel 滤波与加权平均的思想，可靠的获得各项特征信息。

(4) 设计并实现一种基于 PID 控制器的实时控制方法进行焊缝自动跟踪。在确定实验装置步进驱动的精度的基础上，控制步进机完成在不同间隙下的有横摆和无横摆纠偏过程，有效提高了设备的自动化程度。

(5) 开发软件实现了该焊接监控系统。

7.2 下一步的工作

虽然本系统的开发和研究取得了一定的成果，但是还存在不少问题，需要进一步的研究，主要概括如下：

(1) 缺陷检测。目前图像处理还存在一些问题，例如：错边过大时，错边在图像上的特征不明显，此时，焊缝跟踪效果收到一定影响，可能引起错误判断和纠偏。我们需要进一步研究图像处理算法，提高判断错边的健壮性，以及在这些外观焊接缺陷下合适的控制机制。

(2) 熔池信息质量控制。本文仅仅从二维的角度提取了熔池边缘信息，并没有计算熔池最大宽度、后部面积、最大长度以及半长等，也没有观测熔池温度、深度等三位特征。而这些几

何信息与熔透情况和焊缝成形有着很大程度的关联，是质量控制的主要影响因素，因此在基于熔池信息进行质量控制方面，需要做进一步研究。

(3) 干伸长自适应。焊枪喷嘴到被焊接工件的高度是焊丝伸出的长度，被称作为干伸长。它的变化对弧长，熔滴过渡方式、熔深、熔透性等有显著影响，本系统中会存在管焊工件表面的不平整所引起的焊炬高度的偏差，这样就需要调整焊枪高度。当焊炬高度发生变化，会使得焊接过程出现静态偏差，而此波动就导致熔池体积发生变化，进而影响到焊接质量。为了提高系统功能的完善性，得到均匀稳定的焊接质量，在匹配合适焊接工艺参数下，通过检测焊丝伸出长度，建立一个焊炬高度控制系统来进行精确的高度调整是焊接监控系统中一个亟待解决的问题。

(4) 系统软件功能集成实现。自动化焊接过程不仅包括从起弧到熄弧的焊接过程中的自动跟踪与实时控制，还包括焊接前、焊接结束时，焊接设备的初始化等等。因此下一步的软件设计可以将电机的点动控制和气缸、滤光片等辅助设备以及焊接设备的初始化等等方面的功能完全集成到软件中去，实现焊接过程全自动控制。

参考文献

- [1] 王克鸿, 高飞, 高俊平. 基于视觉的机器人智能化焊接技术现状与发展. 机械制造与自动化, 2010, 39(5): 1-6
- [2] 毕胜. 国内外工业机器人的发展现状. 机械工程师, 2008, (7): 5-7
- [3] 宋金虎. 我国焊接机器人的应用与研究现状. 电焊机, 2009, 39(4): 18-20
- [4] P. Drews, G. Starke. Welding in the Century of Information Technology. Welding in the World. 1994, 34: 5-20
- [5] Trailer . Manufacturer Depends on Robotic Welding to Boast Production . Welding Journal. 1995. 74(7): 50-51
- [6] J. D. Lane. Robotic Welding State of the Art. Robotic Welding International Trends in Manufacturing Technology. IFS(Publications)Ltd. UK, 1987: 110
- [7] B. H. You, J. W. Kim. A Study on an Automatic Seam Tracking System by Using an Electromagnetic Sensor for Sheet Metal arc Welding of Butt Joints . Engineering Manufacture. 2002, 216(B6): 911-920
- [8] 饶政华. 熔化极气体保护焊传热和传质过程的数值研究, [博士学位论文]. 中南大学, 2010
- [9] 陈华斌. 运载火箭动力系统五通连接器机器人 GTAW 质量控制系统, [博士学位论文]. 上海交通大学, 2009
- [10] 黄鹏飞, 高文宁, 卢振洋等. 基于 CAN 总线的 GMAW 焊机网络监控系统. 电焊机, 2009, 39(8): 45-48
- [11] 黄峰, 倪纯珍, 陈立功. 分布式多焊机参数远程监控系统研究. 第九次全国焊接会议论文集(第 2 册), 黑龙江, 1999: 431-437
- [12] 王鑫. 钻杆对焊自动找正及焊区热处理监控系统研究, [硕士学位论文]. 合肥工业大学, 2003
- [13] 叶彦斐, 李训铭. 管塔焊接自动化监控系统设计与实现. 自动化仪表, 2006, 27(5): 49-51
- [14] Sukhomay Pal, Surjya K. Pal, Arun K. Samantaray. Artificial neural network modeling of weld joint strength prediction of a pulsed metal inert gas welding process using arc signal. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 202(3): 464-474
- [15] Kovacevic R, ZHANG Y M, LI L. Monitoring of weld joint penetration based on weld pool geometrical appearance. Welding Journal, 1996, 75(10): 317-320.
- [16] Haibo Fan, Nanda K. Ravala, H C. Wikle, et al. Low-cost Infrared sensing system for Monitoring

- the Welding Process in the Presence of Plate Inclination Angle. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003(140): 668-675
- [17] 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(120): 458-465
- [18] Wei Lu, YuMing Zhang. A Robust sensing and control of the weld pool surface. *Journal of Measurement Science and Technology*, 2006, 17(9): 2437-2446
- [19] 赵冬斌, 陈善本, 吴林等. 填丝脉冲 GTAW 熔池形状定义和图像处理. *焊接学报*, 2001, 22(2): 5-8
- [20] 陈善本, 曹建明, 徐晨明等. 脉冲熔化极气体保护焊熔池的视觉传感与实时控制. *焊接学报*, 2002, 23(4): 17-20
- [21] 吴迪. 不锈钢薄板 TIG 焊熔池图像处理及视觉特征计算, [硕士学位论文]. 上海交通大学, 2010
- [22] 高进强, 武传松, 刘熙章等. GMAW 根部间隙及焊枪对中信息的视觉检测. *焊接学报*, 2005, 26(9): 23-26
- [23] 游秋榕. 基于熔池视觉的 MAG 焊焊接缺陷特征识别[硕士学位论文]. 南京理工大学, 2006
- [24] 郑军, 潘际銮. 基于视觉检测的焊缝跟踪技术. *金属加工(热加工)*, 2008, (24): 37-38
- [25] Mike Wilson. Vision systems in the automotive industry. *Industrial Robot*. 1999, 26(5): 354-357
- [26] 钱伟方, 姚舜, 项峰等. 基于 PC 控制的窄间隙 GMAW 焊缝跟踪系统. *焊接技术*, 2002, 31(6): 32-33
- [27] 尹力. 旋转电弧脉冲 GMAW 焊焊缝跟踪系统的研究, [硕士学位论文]. 湘潭大学, 2007
- [28] 钱晨, 王钦若, 谢晨阳. 模糊控制在焊缝跟踪系统中的应用研究. *广东工业大学学报*, 2005, 22(2): 41-44
- [29] 叶建雄, 张华, 杨武强. 焊缝跟踪的变论域自适应模糊控制. *焊接学报*, 2005, 26(12): 32-34
- [30] 贾剑平, 徐坤刚, 李志刚. 基于模糊自适应整定 PID 的水下焊缝跟踪. *上海交通大学学报*, 2008, 42(S1): 69-72
- [31] Masao USHIO, Wenjie Mao. Sensors for arc welding: advantages and limitations. *Transaction of JWRI*, 1994, 23(2): 135-141
- [32] Wellington S. J. , Crowder R. M. A non-tactile sensor for seam tracking and vision applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control(Control'94)* , 1994, 1: 822-826

- [33] A. Bzymek, A. Czuprynski, M. FidaliAnalysis, et al. Analysis of image recorded during welding processes . Proceedings of 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography(QIRT'2008), 2006, 28(1): 25-29
- [34] Paul Drews. A Intelligent systems for welding process automation. Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci.& Eng., 2006, 28(1): 25-29
- [35] 蒋先刚. 数字图像模式识别工程软件设计. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 19-42
- [36] Ostu N. A Threshold Selection Method from Gray level Histogram. IEEE Trans actions on SMC, 1979, (9) : 62-67
- [37] 范立南, 韩晓微, 张广渊. 图像处理与模式识别. 北京: 科学出版社, 2007: 56~62
- [38] HUA Yanping, YU Xiangjun, LU Zhenzhong. Skeleton extraction of boiler flame images based on mathematical morphology. Journal of Southeast University(English Edition), 2003, 19(4): 352~354
- [39] Soile P. Morphological image analysis applied to cropfield mapping. Image and Vision Computing, 2000, 18(13): 1025-1032
- [40] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models. International Journal of computer vision. 1987, 1(4): 321-331
- [41] Roman G, Ron K, Ehud R, et al. Fast geodesic active contours. IEEE Transaction on Image Processing, 2001, 10(10): 1467-1474
- [42] Luminita A V, Tony F C. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah mode. International Journal of Computer Vision, 2002, 50(3): 271-293
- [43] V. Caselles, F. Catte, T. Coll, et al. A geometric model for active contours in image processing. Numerische Mathematic, 1993, 66(1): 1-31
- [44] Chan T, Vese L A. Active contours without edges. IEEE Transaction on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277
- [45] 范芳蕾, 李亮玉, 岳建峰等. GMAW 焊熔池图像处理算法. 机械科学与技术, 2008, 27(10): 1199-1201
- [46] GAO X. D., NA S. J. . Detection of Weld Position and Seam Tracking Based on Kalman Filtering of Weld Pool Images. Journal of manufacturing system, 2005, 24(1) : 1-12
- [47] 高向东, 赵传敏, 白天翔等. 傅立叶变换在熔池图像特征提取中的应用. 焊接学报, 2008, 29(08): 13-16
- [48] 薛家祥, 刘晓, 张丽玲等. 基于小波变换的 MAG 焊焊缝跟踪. 焊接学报, 2006, 27(06): 13-16

- [49] Lei Zhang, Yongkang Xu. Features Extraction for Structured Light Stripe Image Based on OSTU Threshold. Proceedings of 2010 International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management(CCCM2010), 2010, Yangzhou, China
- [50] 林俊, 徐杜, 蒋永平等. 基于梯度的动态分块迭代阈值图像二值化方法. 光学与光电技术, 2006, 4(05): 98-100
- [51] 张华军, 蔡春波, 张广军等. 背面 CCD 视觉传感焊缝成形参数的自动提取. 焊接学报, 2008, 29(09): 101-104
- [52] 刘晓, 薛家祥, 许策明. 基于分形和数学形态学的 MAG 焊熔池图像分析. 电焊机, 2009, 39(07): 81-84
- [53] Serra J. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press. London, 1982
- [54] LIU J, FAN Z, OLSEN S. Using active contour models for feature extraction in camera-based seam tracking of arc welding. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'09) , 2009, 5948-5955
- [55] 李寿涛, 陈浩, 朱瑞辉等. CV 主动轮廓模型在管道焊缝缺陷检测中的应用. CT 理论与应用研究, 2008, 17(04): 55-61

致谢

研究生生活就要结束了。这一路走来，无论专业技能还是人生经历，我都有了新的体验。在此论文完成之际，谨向研究生阶段给我培养教育、帮助支持的老师、同学和朋友们致以诚挚的谢意！

首先，我要衷心感谢我的导师李静副教授，从论文的选题到研究工作的逐步深入，李老师都给我细致的指导意见，使我能够顺利地完成硕士研究生的科研和学习工作。在论文的撰写过程中，李老师也倾注了大量的心血和精力，给出大量有价值的修改意见。硕士研究生学习和生活期间，李老师卓越的学识、严谨的治学态度、忘我的敬业精神，也无时无刻地教育和影响着我。

感谢李修忠师兄在课题研究上给我的指导，感谢付焕焕、董凤春她们与我共同探讨学术问题，互相勉励，一起度过令人难忘的求学时光，感谢胡海林师弟对我的支持。同时感谢昆山华恒焊接有限公司的同事们，感谢朱伟、李芳在课题的研究过程中给予了很多宝贵的意见。谢谢大家对我课题研究的支持，也感谢大家给我论文上的帮助！

我还要对家人致以最衷心的感谢，在漫长的求学生涯中，我前进的每一步中都渗透了他们辛劳的汗水、无私的奉献和殷切的期望。他们对我的无限关爱是我成长的动力所在，是我能够顺利完成学业的精神支柱。

最后，还要衷心感谢各位答辩委员在百忙中抽出时间来审查和听取答辩，并提出宝贵的意见，谢谢！

在学期间的研究成果及发表的论文

攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况

1. 张敏, 李静. 一种采用数学形态学与主动轮廓模型的熔池边缘提取方法. 电焊机. 已录用.
2. 李静, 李芳, 秦小麟, 朱伟, 张敏, 钱鲁泓. 结合 Sobel 算子与 Snake 模型的焊缝图像边缘提取. 小型微型计算机系统. 已录用.
3. Jing Li, Yi Zhuang, Fang Li, Wei Zhu, Xiongjian Liao, Min Zhang. A detailed design model based on trust chain for seam tracking system of gas metal arc welding. The 2nd international conference on information science and engineering, December, 2010, Hangzhou China. 已录用.

攻读硕士学位期间参加科研项目情况

1. 2010.04 — 2010.12 江苏省重大科技成果转化专项资金项目(BA2007058), 校科技创新人才基金(1004—56V1098)“基于 CCD 被动光的管道打底焊监控系统”
2. 2009.09 — 2010.04 爱立信 RNC 功能测试开发
3. 2008.10 — 2009.08 上海市水务规划设计研究院水利系统开发