

国内图书分类号: TP242.3  
国际图书分类号: 621.585.5

工学博士学位论文

基于视觉传感管道焊接机器人  
跟踪系统研究

博 士 研 究 生: 李 慨  
导 师: 蔡鹤皋 院士  
申 请 学 位: 工学博士  
学 科 、 专 业: 机械电子工程  
所 在 单 位: 机电工程学院  
答 辩 时 间: 2007 年 2 月  
授 予 学 位 单 位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TP242.3

U.D.C.: 621. 585. 5

Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering

# **RESEARCH ON VISION-BASED TRACKING SYSTEM FOR PIPELINE WELDING ROBOT**

<b>Candidate:</b>	Li Kai
<b>Supervisor:</b>	Academician Cai Hegao
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Doctor of Engineering
<b>Specialty:</b>	Mechatronics Engineering
<b>Affiliation:</b>	School of Mechatronics Engineering
<b>Date of Defence:</b>	February, 2007
<b>Degree-Confering-Institution:</b>	Harbin Institute of Technology

## 摘 要

我国西北地区油气资源丰富，而东部沿海市场需求巨大，这样的产销分离促使管道输送业蓬勃发展。目前管道建设中管道对接环形焊缝的现场焊接多由手工完成，或采用需要人工干预的轨道式自动焊接设备，严重制约了管道建设的发展。因此开展智能化管道焊接机器人研究，提高管道焊接质量和效率，具有巨大的经济效益和社会效益。

管道焊接机器人属特种机器人研究领域。本研究针对大型油气输送管道(直径 $\geq \Phi 600\text{mm}$ )现场施工条件下对接环形焊缝的自动化焊接技术，在结构光视觉传感器的模型建立及参数选择，焊缝图像的处理方法，移动焊接机器人跟踪控制方法等方面进行深入研究，研制出基于视觉传感的管道焊接机器人焊缝跟踪系统。

本文应用透视成像原理通过坐标变换推导出结构光视觉传感器的模型，建立传感器成像点与被测物上点之间的变换关系。应用光度学理论，结合光学成像系统与带通滤光片的作用，推导出视觉传感器输出灰度图像的弧光干扰模型，指导结构光视觉传感器设计过程中传感检测位置以及摄像机倾角等参数的确定，以减少弧光干扰，有效地提高了焊缝图像的信噪比。

由视觉传感器焊缝图像快速可靠提取焊缝特征信息是实现焊缝跟踪的关键。通过对图像处理方法的深入研究，针对结构光视觉传感器焊缝图像中干扰的特点，采用一维离散 LoG(Laplacian of Gaussian)滤波、邻域均值滤波、基于先验知识改进的最大方差阈值分割和标记法小区域去噪组成焊缝图像预处理方法，快速获得清晰的焊缝图像。然后对焊缝图像进行数学形态学细化处理得到焊缝骨架，可靠提取了焊缝特征信息。结果表明，采用这种处理方法结构光视觉传感图像具有良好的抗干扰性，处理一幅像素  $400 \times 300$  图像的时间不大于 0.08 秒，满足焊缝跟踪的需要。

针对滑动转向移动机器人和直角坐标焊枪调整机构组成的管道焊接机器人，应用 Lyapunov 稳定性理论设计了管道焊接机器人环形运动控制律；提出基于圆柱坐标的管道焊接机器人环形焊接焊缝跟踪算法；为提高焊缝跟踪精度，研究了当管道焊接机器人车轮轴线与管道轴线有偏角时的跟踪补偿方法。

研制出焊枪侧置形式的管道焊接机器人样机，由永磁轮吸附在焊缝一侧的被焊管道上运动，与骑跨在焊缝上的管道焊接机器人相比，使焊缝跟踪精

度不受管道对口精度的影响，并可以完成管道弯角对接焊缝的焊接，扩大了其工作范围。

研制出一套结构光视觉传感器，编制了焊缝图像处理软件。基于 LabVIEW 软件平台研制出能实现图像采集、角度传感器信号采集、伺服电机运动控制等的管道焊接机器人测控系统。

实验表明，基于视觉传感管道焊接机器人跟踪系统可靠性高，满足管道焊接对跟踪系统的要求。

**关键词** 机器人；视觉传感器；图像处理；焊缝跟踪；管道

## **Abstract**

In northwest China there are abundant resources of oil and natural gas, but tremendous market requirement are there in southeast China. So the enormous separation between product and sale promotes of pipeline transportation industry. Recently, the pipeline construction technology relies on manual welding or orbited-welding device manipulated by workman, which enormously restricts the development of pipeline transportation industry. Therefore, development of intelligent pipeline welding robot will bring immense economic and society benefit.

Pipeline welding robot belongs to the research field of special type robotics. Aimed at automatic girth welding of the large diameter pipelines on condition of field operations, researches are lucubrated on modeling and parameters selection of structured light sensor, processing methods of seam images, seam tracking of mobile welding robot. A seam tracking system for girth-welding robot based on vision sensing is developed.

The model of a vision sensor based on structured light is educed with perspective imaging and coordinate transform principle. Using luminosity theory and considering the function of optics imaging system and light filter, the model of sensing image influenced by arc noise is established, with the distance between the arc point and the structured light stripe on the work-piece and the angle between the axis of CCD camera and the plane of structured light. With the model, approaches are derived to decrease arc disturbance and improve quality of sensing images, guiding to optimize the structure parameters of structured light sensors.

Adaptive thresholding segmentation method used Maximal square difference within selected section based on priori information is developed. A compounding including this developed method, one dimension discrete LoG (Laplacian of Gaussian) filter, neighborhood averaging filter, labeling technique for small dollops removal is to be used to pre-process seam images. Then the skeleton of seam is extracted using morphologic thinning. As a result, the characteristic information is extracted rapidly and stably. Experiments show that by using this

compounding processing, the seam tracking system acquires powerful anti-jamming ability. Within 0.08s, a 400×300 pixels image can be processed, so it can meet the requirement of field welding.

Aimed at the pipeline welding robot, the controller for girth locomotion is designed using Lyapunov stability theory. A seam tracking arithmetic based on cylinder coordinate is developed aimed at pipeline girth welding robot, and compensate value is calculated when axis of welding robot departs from the pipeline axis.

A prototype of pipeline welding robot with welding torch positioned at one side of welding robot is developed. Attaching on one of welded pipelines by permanent magnet wheels, it avoids effect of the staggered butt joint on precision of seam tracking, compared with the structure straddling on both side of welded pipeline. For an extended work, it can be used on welding of butt joint of two non-coaxial pipelines.

A structured light sensor and the control system using LabVIEW with image picking, inclinometer information picking and servo motors control are taken in practice and the soft program is worked out.

Seam tracking experiment shows the seam tracking system is with high reliability, and meets the requirement of pipeline girth welding.

**Keywords** robot, vision sensor, image process, seam tracking, pipeline

摘要 .....	I
Abstract .....	III
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题背景及国内外研究动态 .....	1
1.1.1 油气输送管道建设现状 .....	2
1.1.2 油气输送管道建设技术发展现状 .....	3
1.1.3 目前存在的问题 .....	8
1.2 移动焊接机器人的关键技术 .....	10
1.2.1 信息传感技术 .....	10
1.2.2 移动操作机器人技术 .....	14
1.2.3 跟踪控制技术 .....	15
1.2.4 控制器架构 .....	16
1.2.5 磁吸附技术 .....	17
1.3 选题意义及本文的主要研究内容 .....	17
第 2 章 视觉传感器数学模型及参数确定 .....	20
2.1 引言 .....	20
2.2 结构光视觉传感器工作原理 .....	20
2.3 结构光视觉传感器的数学模型 .....	21
2.4 弧光干扰模型的建立 .....	25
2.5 结构光视觉传感器结构参数的确定 .....	30
2.5.1 半导体激光器和滤光片的选择 .....	31
2.5.2 摄像机倾斜角度的确定 .....	32
2.6 本章小结 .....	35
第 3 章 焊缝图像处理 .....	36
3.1 引言 .....	36
3.2 焊缝图像的预处理 .....	37
3.2.1 焊缝图像的滤波 .....	37
3.2.2 焊缝图像的平滑 .....	39
3.2.3 焊缝图像的分割 .....	45

3.2.4 焊缝图像的孤点滤波.....	52
3.3 焊接特征信息的提取 .....	53
3.3.1 焊缝图像中心提取.....	53
3.3.2 焊缝图像毛刺的去除.....	56
3.3.3 焊缝特征信息提取.....	58
3.4 本章小结 .....	61
第 4 章 管道焊接机器人的焊缝跟踪控制 .....	62
4.1 引言 .....	62
4.2 管道焊接机器人的结构.....	62
4.3 管道焊接机器人的运动学模型 .....	63
4.3.1 滑动转向移动机器人的模型.....	63
4.3.2 环形运动控制 .....	68
4.4 管道焊接机器人的焊缝跟踪.....	70
4.4.1 理想状态下管道跟踪算法.....	70
4.4.2 实际焊接中的控制补偿.....	73
4.5 本章小结 .....	74
第 5 章 管道焊接机器人及跟踪实验 .....	75
5.1 引言 .....	75
5.2 管道焊接机器人系统 .....	75
5.2.1 管道焊接机器人本体.....	75
5.2.2 视觉传感器 .....	84
5.2.3 管道焊接机器人控制系统.....	85
5.3 管道焊接机器人焊接跟踪实验.....	90
5.4 本章小结 .....	98
结论 .....	99
参考文献 .....	101
攻读学位期间发表的学术论文 .....	109
哈尔滨工业大学博士学位论文原创性声明 .....	110
哈尔滨工业大学博士学位论文使用授权书 .....	110
哈尔滨工业大学博士学位涉密论文管理 .....	110
致谢 .....	111
个人简历 .....	112



# Contents

<b>Abstract (Chinese).....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract (English).....</b>	<b>III</b>
<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Background of this Dissertation and Survey of Welding Robot.....	1
1.1.1 Actuality of Construction of Oil and Gas Transport Pipeline .....	2
1.1.2 Actuality of Construction Technology of Pipeline .....	3
1.1.3 Problems at Present .....	8
1.2 The Key Technology of Mobile Welding Robot .....	10
1.2.1 The Sensing Technology .....	10
1.2.2 Mobile Manipulators Technology .....	14
1.2.3 Tracking Control Technology .....	16
1.2.4 The Frame of Controller .....	16
1.2.5 Magnetism Attraction Technology .....	17
1.3 Research Signification and Main Research Content .....	17
<b>Chapter 2 Mathematic Model and Parameters of the Vision Sensor .....</b>	<b>20</b>
2.1 Introduction .....	20
2.2 The Working Principle of Structured Light Vision Sensor .....	20
2.3 The Mathematic Model of Structured Light Vision Sensor.....	21
2.4 The Model of Arc Noise .....	25
2.5 Parameters of Structured Light Vision Sensor .....	30
2.5.1 Selection of Semiconductor Laser and Interference Filter .....	31
2.5.2 Selection of Slope Angle of CCD Camera.....	32
2.6 Summary.....	35
<b>Chapter 3 Seam Image Processing .....</b>	<b>36</b>
3.1 Introduction .....	36
3.2 Seam Image Preprocessing .....	37
3.2.1 LoG Filtering .....	37
3.2.2 Smoothness Processing .....	39
3.2.3 Segmentation Processing .....	45

3.2.4 Acnode Filtering with Labeling Technique .....	52
3.3 Seam Characteristics Acquiring .....	53
3.3.1 Thinning of Seam Image .....	53
3.3.2 Processing of Wiping off Burr .....	56
3.3.3 Extraction of Seam Characteristics .....	58
3.4 Summary .....	61
<b>Chapter 4 Seam Tracking Control of Pipeline Welding Robot .....</b>	<b>62</b>
4.1 Introduction .....	62
4.2 Structure of Pipeline Welding Robot .....	62
4.3 The Dynamic Model of Pipeline Welding Robot .....	63
4.3.1 The Model of Skid Steering Mobile Robot .....	63
4.3.2 The Girth Motion Control .....	68
4.4 Seam Tracking Control of Pipeline Welding Robot .....	70
4.4.1 The Ideal Arithmetic for Pipe Seam Tracking .....	70
4.4.2 The Compensation for Control in Practical Welding .....	73
4.5 Summary .....	74
<b>Chapter 5 Pipeline Welding Robot and Seam Tracking Experiments .....</b>	<b>75</b>
5.1 Introduction .....	75
5.2 Design of Pipeline Welding Robot System .....	75
5.2.1 Design of Main Body of the Robot .....	75
5.2.2 Design of Vision Sensor .....	84
5.2.3 Design of Control System .....	85
5.3 Seam Tracking Experiments in Pipeline Welding .....	90
5.4 Summary .....	98
<b>Conclusion .....</b>	<b>99</b>
<b>References .....</b>	<b>101</b>
<b>Paper Published in the Period of Ph.D. Education .....</b>	<b>109</b>
<b>Statement of Copyright .....</b>	<b>110</b>
<b>Letter of Authorization .....</b>	<b>110</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>111</b>
<b>Resume .....</b>	<b>112</b>

## 第1章 绪论

### 1.1 课题背景及国内外研究动态

自从 20 世纪 60 年代初世界上第一台机器人诞生以来，机器人技术快速发展，已经形成一门专门的交叉学科——机器人学<sup>[1]</sup>。它以研究、设计、制造、应用机器人为主要内容，集中了机械工程、电子工程、计算机工程、自动控制工程、人工智能、仿生学、传感技术、信号处理技术等多学科的最新成果，代表了机电一体化的最高成就，也是工程领域一个研究热点。当今机器人技术发展的趋势主要有两个突出的特点：一是机器人应用领域不断扩大，机器人的种类日益增多；另一个则是机器人的性能不断提高，并向智能化方向发展<sup>[2]</sup>。

在金属制造业中，焊接是仅次于装配和机加工的第三大产业。焊接技术作为一门综合性应用技术，具有典型的多学科交叉融合的特点。焊接自动化、柔性化与智能化已成为保证焊接质量、提高生产效率、改善劳动条件、降低焊接产品制造成本的重要手段。在焊接生产中采用机器人技术，实现焊接自动化已成为焊接技术现代化的主要标志<sup>[3~7]</sup>。

从机器人诞生直到目前，机器人使用最多的是在焊接领域。据统计，到 2000 年底世界实际在役工业机器人约 75 万台，其中焊接机器人占 50%以上。

我国从 20 世纪 70 年代初开始研究应用弧焊机器人。弧焊机器人的研究已经历了三个阶段：示教再现、离线编程和自主编程的智能机器人，当前的应用水平处于第二阶段。操作者通过示教盒在直角坐标系和极坐标系中移动机器人各关节，使焊枪沿焊接轨迹运动，在焊枪路径上记录示教的位置、焊枪姿态、运动参数和工艺参数，并生成一个连续执行全部操作的示教程序。此类机器人不具备对工件装配误差、焊接过程中的热变形等环境和对工作对象变化的自适应能力。而弧焊机器人对末端执行器(焊枪)的运动轨迹要求有严格的精度，空间位置焊接时的焊枪姿态及焊接规范在整个轨迹上都需要连续调整。因此具有智能传感功能、能够自动制定运动轨迹、焊枪姿态和焊枪参数的新一代的智能机器人成为未来的发展方向<sup>[8,9]</sup>。开发弧焊机器人智能化应用技术，发展激光视觉跟踪、熔池视觉自适应焊接技术、焊接工艺专家

系统技术等智能化技术,减小因装配、变形等因素引起的位置误差对焊接质量的影响<sup>[10]</sup>,减轻焊接生产劳动强度,是目前的主要的研究方向。

当前焊接机器人的应用多采用传统的关节机器人加变位机的形式,为了扩大工作空间采用三自由度龙门架构成冗余机器人系统,但其应用局限于结构化环境中<sup>[11]</sup>。而在一些非结构化环境如大型球罐制造、长输油管道焊接及水电站水轮机叶片修复等现场野外作业中,传统的固定式机器人已无法满足要求,开发适合于非结构化工作环境的特种焊接机器人成为机器人应用研究的一个重要发展方向<sup>[12]</sup>。

### 1.1.1 油气输送管道建设现状

长输管道作为铁路、公路、海运、民用航空和长输管道五大运输行业之一。其输送介质,除常见的石油、天然气外,还有工业用气体如氧气、CO<sub>2</sub>等、乙烯、液氨、矿浆、煤浆等介质。

调查表明,自1948年有管道建设里程统计以来,截止到2000年全世界已建管道总里程达174余万公里。国际权威机构美国Oildom出版公司2003年8月公布的调查统计,全球在建和拟建油气管道总里程为75540公里,其中拟建管道58581公里,在建管道16923公里<sup>[13]</sup>。

长输管道是远距离油气输送的主要方式。随着我国能源工业的发展和能源结构的调整,长输管道工程建设迅猛发展。除煤浆管道仍在酝酿阶段外,其他输送介质管道在国内均有成功建设、运行业绩。截止2003年底,输油气管道累计长度45865公里,居世界第六位;其中原油管道15915公里、天然气管道21299公里、成品油管道6525公里、海底管道2126公里。“西气东输”、“冀宁联络线”、“陕京二线”、“西部管道”等国内大型管道工程相继建成投产或即将完工,跨国管道“中哈管线”也即将完工,与俄罗斯及邻国、中亚等国的管线建设一直都在紧张筹划中。据国家规划,至2020年,我国油气输送管道基本形成分布合理、联络成网、互相调配、安全可靠、覆盖全国主要区域的油气管网,以满足社会经济发展和人民生活需要。

现在长输管道工业的发展趋势是建设大口径、高压力的大型管道。当其它条件基本相同时,随管径增大,输油成本降低。在油气资源丰富、油源有保证的前提下,建设大口径管道的效益会更加明显。我国原油管道现有最大管径 $\Phi 720\text{mm}$ ,国外目前输油管道最大管径为 $\Phi 1220\text{mm}$ 。我国目前建设的西气东输工程的天然气管道直径达到 $\Phi 1016\text{mm}$ ,而国外最大的天然气管道

直径达到  $\Phi 1400\text{ mm}$  以上。提高管道工作压力，可以增加输量、增大站间距、减少站数，从而使投资减少、降低输送油气的成本。

管道建设采用现场组对焊接，多为野外施工，条件恶劣，对接环焊部位是失效事故的多发位置，管道焊接技术是施工中必须确保的关键技术，不仅直接关系到工程的焊接质量、施工效率和成本，而且对管线运行期间的安全可靠性和经济效益也有重要影响。因此，开展管道工程的焊接技术研究，提高自动化焊接技术水平，是长输管道优质、高效施工的必然要求。

### 1.1.2 油气输送管道建设技术发展现状

**1.1.2.1 焊接方法** 目前国内外长输管道常用焊接方法主要有：(1)手工焊，包括药皮焊条电弧焊(SMAW)、手工钨极氩弧焊(TIG)；(2)半自动焊，包括熔化极气体保护半自动焊：活性气体保护 STT(Surface Tension Transfer)半自动焊、半自动熔化极氩弧焊(MIG)、半自动活性气体保护焊(MAG)、自保护药芯焊丝电弧焊(FCAW)；(3)熔化极活性气体保护自动焊(AW)。此外，还有埋弧自动焊(SAW)、电阻焊—闪光对焊(FBW)等。

**(1) 手工焊** 手工焊主要指焊条电弧焊和手工钨极氩弧焊。

焊条电弧焊具有灵活简便、适应性强等特点，同时由于焊条工艺性能的不断改进，其熔敷效率、力学性能仍能满足当今管道建设的需要，尤其是焊接补焊时应用更广泛。焊条为纤维素型焊条和低氢型焊条，其下向焊和上向焊两种方法的有机结合及纤维素焊条良好的根焊适应性，在很多场合下仍是其它焊接方法所不能代替的<sup>[14]</sup>。

手工钨极氩弧焊，焊接质量好，背部无焊渣，一般用来进行站场压缩机进出口、球阀等设备，以及管径较小、壁厚较薄的工艺管道，安放式角焊缝的安装焊接。钨极氩弧焊方法要求焊前严格进行坡口清理，焊接过程中须有防风措施。

**(2) 半自动焊** 即自保护药芯焊丝半自动焊和  $\text{CO}_2$  气体保护半自动焊，它们都是下向焊方法。

自保护药芯焊丝半自动焊的特点是操作灵活、环境适应能力强、焊接熔敷效率高、焊接质量好、焊工易于掌握、焊接合格率高。该项技术在 1996 年的库鄯线管道工程中首次应用，随后在苏丹、兰成渝、涩宁兰等管道工程中推广应用。这种焊接方法是目前国内管道工程中重要的填充、盖面焊方法。

CO<sub>2</sub> 气体保护半自动焊, 随着焊接电源特性的改进, 通过控制熔滴和电弧形态。CO<sub>2</sub> 气体保护焊的飞溅问题已基本解决, 并开始在管道焊接中扮演重要角色, 如 STT 型 CO<sub>2</sub> 逆变焊机的应用等。这种焊接方法操作灵活, 焊工易于掌握, 对不同的坡口适应性强, 焊接质量好, 焊接效率高, 焊道光滑, 但焊接过程受环境风速的影响较大。STT 半自动根焊要求管口组对过程中保持对口间隙均匀一致, 否则将会在后序的填充、盖面焊道中产生坡口边缘未熔合、夹渣等缺陷。

### (3) 自动焊 自动焊可应用于根焊和填充、盖面焊。

自动根焊一般采用自动内焊机或外焊机单面焊双面成型。

内焊机的特点为适用的管径范围窄, 设备一次投资较大, 但焊接效率非常高,  $\Phi 1016\text{ mm}$  的钢管根焊需时约 70 秒钟左右。由于是在钢管内进行焊接, 焊接过程中受环境风速的影响比较小。“西气东输”管道工程中使用的自动内焊机是针对  $\Phi 1016\text{ mm}$  管径的管道根焊焊接专机, 分别为英国 NOREAST 公司生产的内焊机和中国石油天然气管道局 PIW3640 型内焊机。

自动外焊机单面焊双面成型根焊设备主要为意大利 PWT 公司的 CWS.02NRT 型自动外焊机, 以及美国 LINCOLN 公司的 STT 电源匹配自动外焊机。自动外焊机单面焊双面成型的根焊设备解决了不用背面衬垫的单面焊双面成形根焊问题, 根焊厚度达 4.5mm, 远高于内焊机的焊接厚度 (1~1.2mm), 焊接效率高,  $\Phi 1016\text{ mm}$  的钢管根焊需时约 8 分钟左右。由于采用气体保护, 焊接过程对环境风速敏感, 施工时应有防风棚等防风措施。

自动外焊机的特点是焊接熔深均匀, 能够焊接的坡口宽度较大, 但通常要求坡口角度大于 13°, 以避免因焊接电弧与母材接触面较小而导致的坡口边缘未熔合。

英国 NOREAST 公司生产的自动外焊机, 加拿大 RMS 公司生产的 MOW-1 型自动外焊机和美国 CRC 公司 M-300 型自动外焊机等, 其特点是易于实现 5~8° 的小坡口角度的焊接操作, 坡口面熔合良好, 但焊接熔深不均匀, 能够焊接的坡口宽度通常不超过 10mm, 否则在仰焊部位难以保证焊缝成型。管道局生产的 PAW-2000 型外焊机, 与中国石油天然气集团公司工程研究院生产的 APW-II 型自动外焊机功能相近。

意大利 PWT 公司生产的 CWS.02NRT 型自动外焊机等, 其特点是焊接熔深均匀, 能够焊接的坡口宽度较大, 且易于实现 5~8° 的小坡口角度的焊接操作, 坡口面熔合良好。

在西气东输管道工程建设之后，我国主要采用自保护药芯焊丝半自动焊和熔化极活性气体保护自动焊。

**1.1.2.2 焊接工艺** 管道焊接施工工艺主要有以下几方面：

(1) **焊接接头坡口形式** 管道焊接施工通常采用的坡口型式为 API 标准 30°V 型坡口，适合手工焊。但对于大口径、厚壁钢管来说，这样的焊接接头坡口型式填充金属量大，劳动强度高，且不适合于自动焊焊接工艺，通常半自动焊用 23°V 型坡口，自动焊用窄间隙复合坡口型式。

(2) **预热与层间温度** 预热的目的是通过减缓母材的应力状态和降低根焊道的冷却速度来防止根部冷裂纹。管道焊接施工的预热温度范围应考虑母材的强度、组织性能变化规律、管径和壁厚，以及焊接材料的含氢量等因素。对于厚壁钢管的多层焊，还要考虑控制焊道层间温度来控制近缝区的冷却速度。层间温度一般与预热温度相近。在避免近缝区过热的前提下，较高的层间温度可防止多层焊时冷裂纹的产生。

(3) **焊接线能量** 焊接线能量的确定需综合考虑母材成分、焊接材料类型、对药皮(药芯、焊剂)的冶金反应和保护气体保护效果的影响、焊前预热状况、层间温度控制情况、管道规格、焊丝(条)直径、热影响区的脆化和软化倾向、所希望的组织 and 力学性能，以及施焊位置、焊接道次、每道焊层厚度、焊缝成型和熔滴的过渡形式等因素。

(4) **后热处理及热处理** 管线焊接施工一般不进行焊后的后热处理和热处理。但对于在高寒地区施工时，当焊前预热和层间温度控制难以起更大作用时，有必要对焊接接头采取一定的后热和热处理措施，保证焊接接头的组织和性能。

(5) **其它** 在管道焊接施工过程中应考虑到高强度、大壁厚钢管所承受的外部应力作用带来的影响。同时应考虑环境温度、环境湿度和环境风速对不同焊接方法的影响，采取必要的措施保证焊接质量。

**1.1.2.3 管道全位置自动焊接** 管道全位置自动焊接就是在管道相对固定的情况下，借助于机械、电气的方法，使焊接设备带动焊枪沿焊缝环绕管壁运动，从而实现自动焊接。

(1) **国外发展概况** 国外一些国家在 20 世纪 60~70 年代已在大中型管道建设中使用了管道全位置自动焊接技术，如 1981 年英国的大不列颠输气管道和 1998 年加拿大的联盟管道<sup>[15]</sup>。美国的 CRC 公司在 1964 年率先将熔化极全位置焊接技术应用于管道施工。到目前为止，CRC 公司生产了 P300, P400, P500 和 P600 四种型号的管道全位置自动焊机。其中 P500 和

P600 是双焊枪管道全位置自动外焊机，它采用了水冷式焊枪、外挂推丝式送丝机构和带有熔滴过渡单元(CDT)的脉冲焊接电源，焊接参数可编程并储存在可方便更换的控制卡上，并根据焊接工艺以及焊接材质的变化要求，随时离线编程。P500 和 P600 适用于窄间隙叠焊或宽间隙排焊，还可完成根焊。生产效率比单焊头自动外焊机提高 40%~50%<sup>[16]</sup>。缺点是焊枪采用强迫水冷却，给实际应用带来许多不便。法国 SERIMER DASA 公司生产的 SatumaxBug 双焊头外焊机，采用了风冷式焊枪、外挂推丝式送丝机构和专用的脉冲焊接电源，计算机焊接编程控制单元和焊车运动控制单元分置，可进行在线编程，可完成根焊、窄间隙叠焊或宽间隙排焊，总体性能与 CRC 的 P500 和 P600 类似。其缺点是双焊头的摆动不能单独控制，计算机焊接编程控制单元和焊车运动控制单元体积偏大。目前，生产全位置自动焊接设备的除美国的 CRC 公司、法国的 SERIMER DASA 公司外，还有德国的 VIETZ 公司、美国的 MAGNATECH 公司、美国的 AMI(ARC MACHINES INC)公司、英国的 Noreast 公司、意大利的 PWT 公司等<sup>[17]</sup>。图 1-1 为美国 AMI 公司研制的 Model 15 Large-Diameter Pipe Weld Head 的照片，图 1-2 为美国 Magnatech Limited 公司 Pipeliner II 的照片。

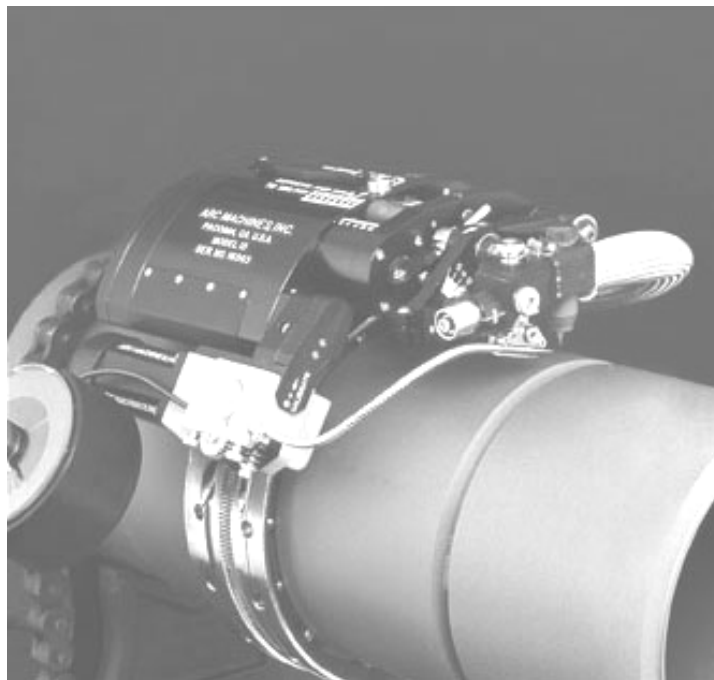


图 1-1 美国 AMI 公司研制的 Model 15 Large-Diameter Pipe Weld Head

Fig.1-1 Model 15 Large-Diameter Pipe Weld Head of AMI



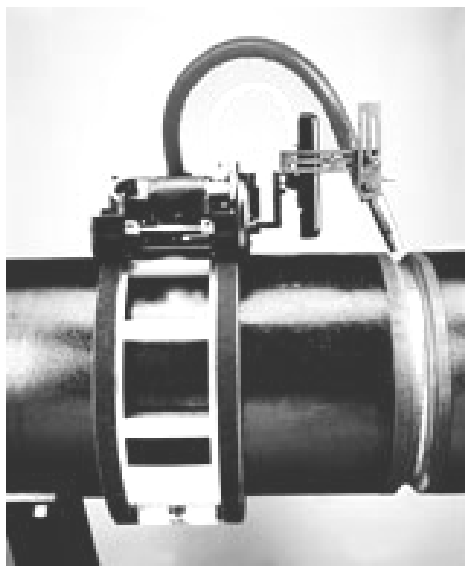


图 1-2 美国 Magnatech Limited 公司 Pipeliner II

Fig.1-2 Pipeliner II of Magnatech Limited

(2) 国内发展概况 国内的管道建设虽然起始于 20 世纪 70 年代，但管道的焊接施工却只停留在手工焊、半自动焊的水平上。从 20 世纪 80 年代开始，国内的许多大专院校、科研机构、施工单位先后开展管道全位置自动焊接技术的研究工作，对设备的结构、控制方式作了探讨，在实验室条件下也取得了一定的成果。清华大学和北京石油化工学院在国家 863 计划支持下研制的 LL-2 管道焊接机器人，采用磁轮吸附，双 CCD 视觉传感器跟踪预先画出的与焊缝平行的跟踪线；焊枪位于车后，磁轮骑跨在焊缝上<sup>[18]</sup>，图 1-3 为 LL-2 管道焊接机器人照片。南昌大学研制的履带式焊接机器人采用履带式永磁吸附机构，CCD 视觉传感跟踪焊缝，无需轨道，可完成储油罐、球罐和船板的焊接<sup>[19]</sup>，但其履带行走机构不适合管道表面的圆周运动。



图 1-3 LL-2 管道焊接机器人

Fig.1-3 LL-2 Pipeline Welding Robot

近年来,我国全位置自动焊接设备也在管道建设中进行了初步应用,如中国石油天然气管道科学研究院研制的 PWA2000 型全位置自动外焊机,图 1-4 为 PAW2000 型管道全位置自动焊机安装现场。PAW2000 型管道全位置自动焊机整套设备由焊接小车、环形可拆卸轨道、计算机自动控制柜、手操作盒、计算机和其他一些辅助配件组成。每台焊接工程车均具有根焊、热焊、填充焊和盖面焊的功能,在福建省漳州市输水管道(管径为  $\Phi 1020\text{ mm}$ )、义马煤气管道(管径为  $\Phi 460\text{ mm}$ )和涩宁兰管道工程中进行了试用<sup>[20]</sup>。中国天然气集团公司工程技术研究院 APW-II 型全位置自动焊机采用以直流脉宽调速为基础,位移传感检测闭环控制为核心的硬件控制电路,在管道全位置自动焊接过程中,焊接参数如电流、电压、焊速、焊枪摆动速度、摆动幅度、两端停留时间,既可预先设定又可分别实时调节。焊机的这一特点使之更加适用长输管线现场组对的复杂情况,在坡口存在错边、宽窄不一等工况下,通过手动实时调节,均可获得优良的焊缝。APW-II 型全位置自动焊机主要用于中大口径管道外环焊缝热焊道、填充焊道、盖面焊道的焊接<sup>[21]</sup>。



图 1-4 PWA2000 管道全位置自动外焊机

Fig.1-4 PWA2000 Pipeline All-Position External Welding Machine

### 1.1.3 目前存在的问题

目前,全位置自动焊技术在大直径厚壁压力管道焊接中全面应用尚有一定难度,其主要原因是:(1)大直径厚壁压力管道的对接环缝组装难以达到均匀一致的高精度,这就要求全位置自动焊设备能根据坡口尺寸和偏差自动调整焊枪位置,从而实现焊缝的自动跟踪。但鉴于焊接过程的应用环境恶劣,

图 1-5 APW-II 型全位置自动外焊机<sup>[22]</sup>Fig.1-5 APW- II Pipeline All-Position External Welding Machine<sup>[22]</sup>

视觉传感器要受到弧光、高温、烟尘、飞溅、振动和电磁场的干扰，故焊缝的自动跟踪实现起来比较困难；(2)焊缝的空间位置不断变化，要求焊接系统能根据焊枪所在位置自动及时调整焊接工艺参数，实现各处焊缝成型基本一致；(3)执行机构，尤其是需高频换向的焊枪摆动机构、传动误差的定量识别及高精度快速实时补偿难度较大<sup>[23]</sup>。

我国长输管道建设中，管道环形对接焊缝的焊接当前主要由手工电弧焊或半自动气体保护焊完成。随着管道建设向大口径、高压方向发展，越来越多地使用大直径的厚壁管道，人工焊接一道焊道的时间以及层间清理时间相应加长，这样会导致层间温度低于要求的预热温度。为了减少冷裂纹的出现，保证焊接质量，增加层间预热负担。另外，质量也受操作工人的技术水平影响较大。

我国目前应用于实际焊接生产的管道全位置自动焊接设备多为引进的国外设备，购置和维护费用很高，对操作人员技术水平要求高。另外还有少量国内管道施工单位研制的专用管焊机在生产中应用。这类设备均需预先敷设轨道，一般不设焊缝跟踪传感器，焊枪位置取决于轨道安装精度，焊接参数预先设置或在线人工调整，很难满足管道全位置自动焊接的需要，焊接质量不易保证。采用视觉传感器跟踪预先划出的与焊缝平行的跟踪线的焊接机器人，不能检测焊缝的截面信息以及焊接变形，在厚壁管道多层多道焊接应用中存在一定局限。因此，亟需发展直接检测焊缝信息的管道全位置焊接机器人，以适应管道建设的需要。

## 1.2 移动焊接机器人的关键技术

为了适应野外自动化作业的需要,移动焊接机器人在平面、球面或弧面上,都能有较大的动作范围,或者说只受电缆限制不受机构限制;在全位置焊接时,还要求能够吸附在工件上爬行。研究这样的智能焊接系统,必须解决以下几个方面的问题:机构方面,必须具有最为合理的自由度配置形式,同时要尽量使机构轻便、运动灵活;自动跟踪传感与闭环控制方面,研究最佳的信息传感方式,使系统具有最强的实时性;控制器方面,研究最合理有效的协调各自由度运动控制的原理与方法。所以,移动焊接机器人的关键技术是传感技术、移动机器人技术、控制技术、磁吸附技术及控制器架构等。

### 1.2.1 信息传感技术

在焊缝跟踪系统中,传感器是关键,它决定着整个系统对焊缝的跟踪精度。在焊接过程中,传感器必须精确检测焊缝(坡口)的位置及形状,在电弧焊接过程中,存在强烈的弧光、烟尘、飞溅、高温辐射及强烈的电磁场干扰等。因此,用于电弧焊接的传感器必须具有很强的抗干扰能力。

目前在移动焊接机器人上采用的传感器主要有电弧传感器、机械传感器及视觉传感器等<sup>[24~26]</sup>。电弧传感器是从焊接电弧自身直接提取焊缝位置偏差信号,不需要在焊枪上附加任何装置,因此其实时性好,可达性及焊枪运动的灵活性都非常好,尤其符合焊接过程低成本自动化的要求。它是利用电弧自身电参数的动静态变化作为特征信号,通过一定的控制策略实现高低及水平两个方向的跟踪控制。但它主要适用于具有对称形状的坡口焊缝跟踪,并且对定位焊点等特殊情况难于识别。

利用电弧本身作为传感器有很多独到的优势,自 20 世纪 80 年代以来,电弧传感作为一种焊接传感手段倍受各国重视,国内外许多焊接设备研究和制造机构都在努力开发这一领域;工业发达国家研究起步较早,已研制多种电弧扫描形式(双丝并列、摆动、旋转)的电弧传感器,适合于埋弧焊、TIG、MIG/MAG 的不同焊接,有些已用于焊接生产<sup>[27,28]</sup>。M. Kodama 等采用高频摆动电弧传感器成功实现了焊缝跟踪<sup>[29]</sup>。国内以清华大学潘际銮院士领导的研究小组这方面工作开展比较早,也最有代表性,取得了卓有成效的成果<sup>[30]</sup>。清华大学吴世德的博士论文较系统地研究了旋转电弧传感机理和电弧传感器信息处理技术<sup>[31]</sup>。湘潭大学的洪波博士也对电弧传感器的数

学模型做了较深入的研究。但据目前已公布的文献表明, 电弧传感器容易受实际焊接传感系统中各种复杂多变因素的影响, 旋转电弧传感机理的研究和信号处理技术还未达到令人满意的程度, 大多还处于简单直观定性分析的水平, 限制了电弧传感器的发展应用<sup>[32]</sup>。

典型的机械接触式传感器是依靠导轮或者导杆在焊枪前方检测焊缝位置, 通过焊缝形状对导杆或者导轮的强制力来导向, 将焊缝偏差信息反映到检测器内, 从而实现焊缝跟踪。接触传感器结构简单, 操作方便, 价格便宜且不受电弧烟尘及飞溅等干扰, 但由于它信息量少, 在移动焊接机器人中, 主要是与其它传感器配合来完成焊缝跟踪任务, 一般很少独立使用。

视觉传感器以其高灵敏度、高精度, 抗电磁干扰, 与工件无接触, 获得焊缝信息丰富, 适用于各种坡口形状等优点, 越来越受到重视, 成为焊缝跟踪传感器研究的热点。目前, 视觉传感器的应用已成为焊缝跟踪技术领域的必然趋势<sup>[33,34]</sup>。

视觉传感器采集的图像有基于自然光、弧光的焊缝图像和以激光为主动光源的结构光图像。其中, 激光作为主动光源具有高能量, 高亮度, 单色性好的优点, 激光结构光视觉传感器被认为是最有发展前景的焊缝跟踪传感器。K. Y. Bae 利用视觉传感器实现了焊缝跟踪和熔池控制<sup>[35]</sup>。吴林教授和陈善本教授对无主动光源的焊接熔池图像的采集与处理做了大量的研究<sup>[36,37]</sup>。

以激光为主动光源的视觉传感器有多种。基于三角测量法原理的激光视觉扫描传感器, 通过实时扫描焊接坡口横截面, 不但可以获得焊枪与坡口之间的二维偏差信息, 还可以检测坡口的形状, 因此它既可以用于焊缝的二维跟踪, 又可以用于焊接参数的控制, 但是扫描控制复杂。图 1-6 是激光视觉扫描传感器示意图。线阵 CCD 传感器信号处理过程简单, 响应速度快, 实时性强, 只能获得一维图像, 所提供的信息量少。面阵 CCD 成像提供的信息量丰富, 适应能力强, 通过计算机处理, 可以充分发挥它的智能。表 1-1 给出不同类型激光视觉传感器的特点比较<sup>[38]</sup>。

结构光视觉传感器以其精度高、灵敏性好、信息丰富和适用范围广等优点, 在众多焊缝跟踪传感器中占有越来越大的比例<sup>[39]</sup>。结构光视觉传感器通常有一线、二线或五线等条形。其中, 国内大都采用的是一线的扫描方案, 日本曾进行过二线扫描方案的研究<sup>[38]</sup>, 结合神经网络的模式识别实现了焊缝的识别与跟踪。德国 DASA(Daimler-Benz Aerospace)的 Barthel Sensorsysteme GmbH 开发的一种三维五线激光传感器, 机器人三维定位或

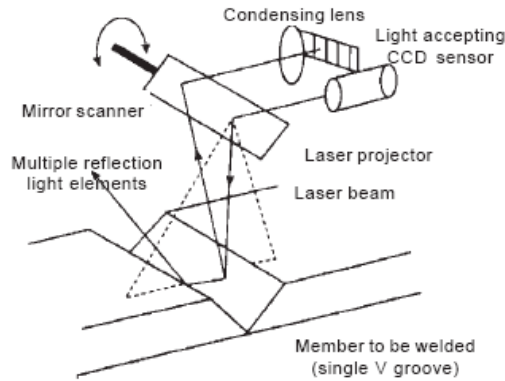


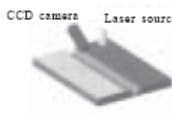


图 1-6 激光视觉扫描传感器示意图<sup>[43]</sup>

Fig.1-6 Laser Sensor Head of Mirror Scanner Type<sup>[43]</sup>

表 1-1 激光视觉传感器的特点<sup>[38]</sup>

Table 1-1 Characteristic of kinds of laser vision sensors<sup>[38]</sup>

	Laser spot light sensor		Laser slit sensor
	Mechanical scanning type	Mirror type	
Detection component	PSD, MOS, CCD	Linear-CCD	CCD camera
Scanning type	Mechanical rocking	Rotation mirror scanner, etc	Not necessary
Scanning speed	Slow	Fast	Not applicable
Processing speed	Slow	Fast	Fast
Influence from surface conditions	Less likely (CCD)	Less likely	More likely
Costs	Low	High	Medium
Schematic diagram			

沿接头的精度为 $\pm 0.05\text{mm}$ ，用于机器人自动激光焊接、切割、密封与定位等情况，速度可达  $20\text{m/min}$ ，图像处理频率为  $50\text{Hz}$ ，适合了三维实时检测。文献[40]提出了基于条状激光的原理和图像处理算法。传感器的光学元件有助于避免光学窗口由飞溅和烟尘所引起的污染，所用的图像传感器即使在焊接弧光照到工件表面上时也能够快速精确地处理图像数据，焊接位置检测精度可达 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

目前，国外已有产品化的结构光视觉传感器。如英国 Meta 技术有限公司的 Meta Torch 系列焊缝跟踪传感器，瑞典 Selcom 公司的 Laser Track 和

Seam Finder 焊缝检测和跟踪传感器等。国内对结构光视觉传感器的研究还处于实验室阶段，还未实现产品化<sup>[41,42]</sup>。

焊接过程中产生的强烈弧光、烟尘、飞溅等现象，进入传感器检测范围，往往与激光光带条纹重叠，甚至将其湮没。对视觉传感器来说，这些激光条纹以外的图像均是噪声信号，在传感器图像处理过程中必须将其滤除。

由于目前结构光法所用的摄像机大都是面阵形式的，当结构光照射在工件表面，经过钢丝刷去除氧化膜、磨削过的铝板或其他金属板的表面时，会产生强烈的二次反射，这些光也成像在传感器敏感面上形成大块噪声，往往使后续的处理失败。另外，投射光纹的光强分布不均匀。由于获取的图像质量要经过较为复杂的后续处理，精度也会有所降低。所以要在系统硬件和软件的后续处理上采取措施，将其负面的影响降低到最小程度。

在结构光视觉传感器的硬件结构方面的研究主要通过选择适当器件、优化设计光路以使：(1)激光器件的中心波长偏离弧光波长峰值；(2)激光条纹具有较好的特性，包括光带与弧光相比具有足够的亮度、光带条纹两端的衰减减小以及较小的光带宽度；(3)适当选择组合滤波技术，尽量滤除弧光干扰以使视觉传感器采集的焊缝图像具有较大的信噪比<sup>[44]</sup>。

结构光传感信息处理时间长，实时性差，使其应用受到一定的限制。因此，针对结构光传感信息处理的特点，研究如何提高结构光传感器图像处理的速度和可靠性对其实际应用有重要意义。

图像处理技术是视觉传感器系统的软核心，它将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，通过一定的算法获得偏差信号。图像处理方法一般包括量化、图像预处理、图像识别等步骤，以获取焊缝位置的精确位置。焊接质量的视觉传感与闭环控制、焊接的路径规划与姿态控制等都要求机器视觉传感与控制具有很强的实时性和很高的控制精度。常用的光学传感器的信息处理频率不超过 10~20Hz，有时很难满足焊接过程实时性的要求，通常不得不牺牲控制精度。为此必须解决视觉传感系统的实时性与精确性的矛盾。在焊缝的图像处理与边缘检测方面，一方面研究根据所跟踪的特定对象，采用不同处理方法的组合提高处理速度和检测精度；未来的趋势主要偏向于智能图像处理算法以及一些新型的数学理论(如分形理论、数学形态学、图像质心算法等)的融入。

多传感器信息融合技术。移动焊接机器人与一般的焊缝跟踪系统不同，现场作业时，空间约束小，自由度大，在焊接过程中具有一定的自主性。现代焊接技术的发展，使焊接系统更加趋于网络化、柔性化和集成化。在焊接



过程中，不但要求系统能够进行焊缝跟踪，还要求进行焊接参数的自动控制，或者需要在非常复杂的焊接空间完成焊接任务。因此，多传感信息融合技术是移动焊接机器人传感器技术发展的必然趋势。

### 1.2.2 移动操作机器人技术

随着机器人应用范围的不断扩大，固定于某一位置操作的机器人并不能完全满足各方面的需要。因此，自 20 世纪 80 年代后期，许多国家有计划地开展了移动机器人(Mobile Robot)技术的研究<sup>[45]</sup>，如美国的 Hughes 人工智能中心在 1987 年首次进行了移动机器人越野实验，Stanford 大学的室内移动机器人能在立体制导系统引导下慢速步行。我国有许多科研院所也较早地开展了对移动机器人的研究<sup>[47]</sup>，如在国家科工委和国家“863”计划的资助下，清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室自 1988 年开始研制 THMR(Tsinghua Mobile Robot)系列移动机器人系统。现在以移动机器人作为载体开发的特种机器人种类繁多，如农业中使用的采摘机器人，智能轮椅<sup>[47]</sup>，水下机器人<sup>[48]</sup>等等。目前，对移动机器人的研究主要集中在移动机器人的信息处理、导航控制上。随着计算机技术、信息技术及控制技术等的迅速发展，让移动机器人具有操作能力是一种必然。给移动机器人装备具有操作能力的机械臂，构成具备移动机器人技术的移动机械臂是该领域近十多年来的一个研究热点。

移动操作机器人系统是将机械臂安装在移动机器人上，因而它比单个移动机器人系统或机械臂系统具有更大的操作空间和更高的灵活性，且其应用范围也比单个系统宽，比如在制造业、较危险的核反应堆建造和维护以及星际探测等方面的应用。由于移动操作机器人系统比单个系统更为复杂，因而给控制和规划带来了更大的困难，为了完成每一具体的工作，移动操作机器人系统必须协调好移动机器人和机械臂的运动<sup>[49~56]</sup>。目前，大部分研究都集中在单个移动机器人系统和机械臂系统的控制与规划上，而对于非完整移动机械臂系统的研究还较少。

20 世纪 80 年代以来，国外开始研究移动操作臂<sup>[57,58]</sup>，S. Dubowsky 研究分析了移动机械臂的柔性<sup>[59]</sup>；O. Khatib 研究了三个完整移动操作臂协调操作<sup>[60]</sup>；W. S. Yoo 研制了移动焊接操作臂，操纵焊枪焊接船体隔板的水平角焊缝<sup>[61]</sup>；H. G. Tanner 研究了农业应用中多移动操作臂的运动学<sup>[62]</sup>。国内对该问题研究起步较晚，近几年才开始起步<sup>[63,64]</sup>。



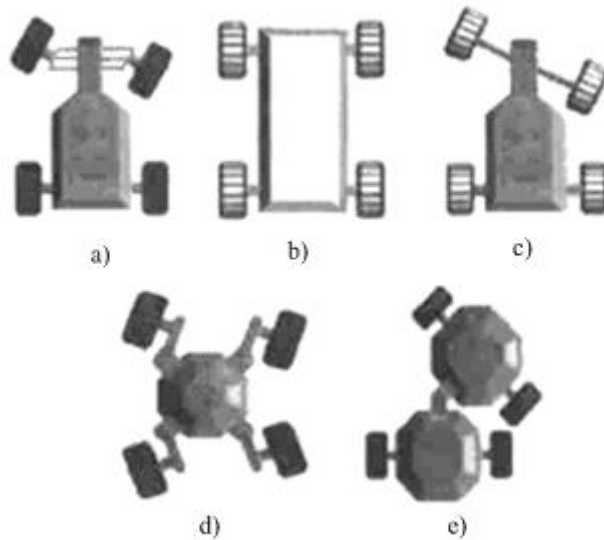
移动焊接机器人的执行机构主要由行走部分和焊枪运动部分组成。为满足实际焊接要求，行走结构部分一般采用小车形式，而机器人执行机构的终端—焊枪的横向与高低调节方式主要有多关节式、柱坐标式、极坐标式和直角坐标式几大类。

移动机器人的行走机构一般有履带式、轮式、步行式和爬行式等，目前移动焊接机器人的行走机构主要是履带式和轮式两类。履带式移动机器人优点是着地面积大，壁面适应能力强，可通过电磁铁吸附控制吸附壁面力的大小，缺点是结构复杂、转向性差，所以这种结构适用于平整壁面、大型球面等曲率小曲面上的爬行焊接。轮式移动机器人优点是移动速度快、转向性好，但着地面积小，壁面适应性差，所以这种结构适应平面横向大范围变化焊缝的焊接和坡度不是很大的斜面爬坡焊接，由于这种移动机器人结构相对简单，所以目前在焊接及其它行业中用得都比较多。

轮式移动机器人的转向结构主要有如下 5 种：阿克曼转向(Ackermann-steered)(图 1-7 a))、滑动转向(图 1-7 b))、轴—关节式转向(图 1-7 c))、全轮转向(图 1-7 d))及车体—关节式转向(图 1-7 e))。其中阿克曼转向是最典型的方法。它通过后轮驱动，前轮从动并转向。在两个转向轮之间通过阿克曼联接使前轮实现同步偏转。滑动转向(Skid steer)的两侧车轮独立驱动，通过改变两侧车轮速度来实现不同半径的转向甚至原位转向，所以又称为差速转向。滑动转向的轮式移动机器人结构简单，不需要专门的转向机构，此外，由于滑动转向结构的高效性和低成本，因而用于诸如农场、果园、矿山、月球、火星等环境，特别是在转向空间受到限制的场地得到广泛的应用<sup>[65]</sup>。

### 1.2.3 跟踪控制技术

跟踪控制是移动机器人运动控制的一个重要问题，分为轨迹跟踪控制和路径跟踪控制两种。在轨迹跟踪控制中，移动机器人要求跟踪的期望轨迹是以时间关系曲线图给出的，而在路径跟踪控制中，期望轨迹是由方便的几何参数来描述的。当要求机器人必须在一个特定的时间内到达一个特定点时，必须采用轨迹跟踪控制；当要求机器人以一个期望的速度跟踪一条由几何参数给出的路径时，可以采用路径跟踪控制。机器人焊接要求对安装于末端执行器的焊枪进行轨迹控制，而轨迹是由焊缝决定。焊缝跟踪就是根据焊缝的空间位置控制焊枪在特定的时刻以要求的姿态定位于焊缝<sup>[66]</sup>。近年来主要集中于考虑非完整约束和力学的作用下，实现有效跟踪的研究。

图 1-7 轮式移动机器人的转向结构<sup>[65]</sup>Fig.1-7 Steering Structures of Wheeled Mobile Robots<sup>[65]</sup>

移动焊接机器人是一个空间多自由度的智能焊缝跟踪系统，它本身具有一定的自主性、对外的感知能力和局部的对跟踪路径的自主规划能力等。在焊缝跟踪的过程中，不但要实时调整焊枪与焊缝之间的偏差，还需要实时调整机器人本体在焊接空间的位姿。一方面，建立精确的数学模型采用经典控制理论控制跟踪；另一方面，如果难以建立精确的数学模型描述系统的情况下，经典控制理论就难以获得满意的效果，采用先进的信息传感技术并在跟踪系统中引入模糊控制、神经网络等智能控制技术就是一个必然趋势。

#### 1.2.4 控制器架构

采用何种控制器架构，与传感器的选择、处理信息量的大小和系统的复杂程度等有关。综合国内外的研究来看，目前主要有以下几种控制器架构：

(1) **PC 机+运动控制器架构** 这是基于 Windows 的移动焊缝跟踪系统，这种架构一般是采用了摄像式视觉传感器，需要处理的信息量大，如 CCD 结构光式传感器来获取焊缝偏差信息。传感器将采集到的电弧区图像信息送到工控机，工控机对图像信息进行处理后，获得焊缝偏差量，将这个偏差量送到专门的运动控制器，从而调节焊枪或者机器人本体的位姿。这种架构的优点是对信息的处理能力极强，操作直观，不但可以进行焊缝跟踪，还可以对焊接参数进行自动控制，也可以方便地与焊接周边设备进行柔性化集

成。缺点是控制系统庞大，移动不方便，对某些野外作业场合不太合适。

(2) **PLC+MCU 架构** PLC(可编程控制器)编程简单、稳定、可靠、抗干扰能力强,而 MCU(微控制器)对信号的处理能力强。将二者结合起来，可以充分发挥二者的优势。现在很多 PLC 可编程控制器都内嵌 MCU，所以以此为核心构建的控制系统，体积小、功能强，比较适合移动焊接机器人这种场合。

(3) **DSP+FPGA+MCU 架构** DSP(数字信号处理器)和 FPGA 可编程逻辑阵列的出现是现代电子技术发展的一个里程碑。利用功能强大的 DSP 作为整个控制系统的核心，MCU 作为专门的运动控制器，而 FPGA 综合控制系统外围所有的数字逻辑,这样的控制系统结构简洁、体积小巧、移动方便、功能强大，而且利用其 CAN 总线很容易与焊接电源、翻转机构等焊接周边外围设备柔性化集成。作者认为，这样的控制器体系架构，是移动焊接机器人比较理想的体系架构。

### 1.2.5 磁吸附技术

移动焊接机器人可能要求在球面、弧面甚至壁面上行走，即使在平面，也要求行走时机构不能打滑。因此，磁吸附技术也是移动焊接机器人的一项关键技术。磁吸附方式分电磁体式 and 永磁体式。电磁体式维持电磁吸附力需要电力，但控制较方便；永磁体式不受断电的影响，使用中安全可靠，目前应用比较多的还是永磁体式。磁吸附又有多种形式，如轮式、步行式、履带式及吸盘式等，它们各有优缺点。车轮式磁吸附方式行走速度快，转弯容易，但吸附力较小；履带式磁吸附爬壁机器人产生的吸附力大，然而履带式磁吸附方式也有转弯困难的缺点。比较各种磁吸附方式，可以看出，履带式磁吸附方式既可以产生很大的吸附力，又具有较大的行走速度，并且越过障碍物的能力强，因此它具有广阔的发展前景<sup>[67]</sup>。目前在焊接领域中，用得比较多的是轮式磁吸附和履带式磁吸附两种方式。

## 1.3 选题意义及本文的主要研究内容

目前，我国已探明的油气资源多分布在东北和西北地区，而消费市场绝大部分在东南沿海和中南部的大中城市等人口密集地区。在这种产销严重分离的现状下，落后的油气产品输送方式已成为油气资源开发和利用的最大障碍。管道输送是突破这一障碍的最佳手段。与铁路运输相比，管道运输是一

种运量大、安全性更高、更经济的油气产品输送方式，其建设投资为铁路的  $1/2$ ，运输成本更只有铁路运输的  $1/3$ 。因此，随着沿海地区油气产品需求量的日益增大，急需配套建设长距离、大口径、高压、高耐蚀性油气输送管网。我国政府已将“加强输油气管道建设，形成管道运输网”的发展战略列入了国家长期发展规划。根据有关方面的规划，未来 10 年内，我国将建成 14 条油气输送管道，形成“两纵、两横、四枢纽、五气库”，总长超过 10 万公里的油气管输格局，这预示着我国即将迎来油气管道建设的高峰期。

面对如此巨大的市场，对管道施工技术提出了新的挑战。而我国还停留在手工焊、半自动焊的水平上，施工速度低及人为因素的干扰，严重制约了油气管道建设的发展。现有的管道环形焊接设备工作前需要先在大型管道上铺设焊接导向的机械模板或装置，或者在大型管道上画出与焊缝相平行的标记线，以引导焊接设备进行环焊。这种前期辅助工作繁琐、劳动强度大、人员操作水平要求高、效率低，特别是安装焊接导向的机械模板、或是描画所述的标记线，都需要操作人员来完成，因而其素质的高低和工作态度的好坏，或者说其工作精度和质量好坏，都将直接影响焊接效果的稳定和优劣，也影响焊接的工作效率和自动化功能的发挥，甚至会导致质量或安全隐患。国内多家研究机构也开展了焊接机器人的研究。清华大学和北京石油学院联合研制的大型球罐焊接机器人、南昌大学研制的履带式智能弧焊机器人都取得了一定的成果。他们均采用跨骑式的结构形式，较好地适应了球罐表面和平面内的自动焊接。而油气管道的敷设环境复杂，需要根据地形的走势，采取相应的角度进行对接，跨骑式结构的焊接机器人不能完成这类接头的焊接。

因此，开展管道焊接机器人的研究，对于我国管道输送业基础建设自动化、高效化发展具有十分重要的理论意义和实用价值。本研究是天津市科技发展计划应用基础研究基金重点项目“管道环型焊接机器人的研制”(项目编号: 033803111)的组成部分，针对大型油气输送管道(直径 $\geq \Phi 600\text{mm}$ )现场施工条件下对接环形焊缝的自动化焊接技术，在结构光视觉传感器的模型建立及参数选择，焊缝图像的处理方法，管道焊接机器人跟踪控制方法等方面进行深入研究，为开发与研制基于视觉控制的管道环型焊接机器人跟踪系统提供理论基础。为此，本文的主要研究内容如下：

- (1) 针对结构光视觉传感器的特点，建立其数学模型。研究在实际焊接条件下提高视觉传感图像信噪比的措施，以减小后续图像处理的负担。
- (2) 针对结构光焊缝图像的特点，研究速度快、可靠性高的有效提取焊

缝特征的图像处理方法。

(3) 针对管道焊接机器人的结构特点，研究可靠、稳定以及高精度的焊缝跟踪控制算法。

(4) 设计管道焊接机器人本体和控制系统软硬结构。

(5) 进行管道焊接机器人焊缝跟踪实验，验证提出的相关理论、方法的合理性与有效性。

## 第2章 视觉传感器数学模型及参数确定

### 2.1 引言

采用线结构光视觉传感器检测焊缝截面尺寸及其位置信息是一种光学视觉传感焊缝检测方法。该方法不接触工件、不受电磁干扰，具有检测精度和灵敏度高、动态响应快、获取的信息量大等特点，是焊缝跟踪传感应用最为广泛的方法。要将摄像机采集的图像信息转换为实际焊缝信息，必须建立视觉传感器的数学模型。焊接过程产生的强烈弧光、热辐射、飞溅以及大量烟尘进入视觉传感区域产生的干扰大幅度地降低了视觉传感信号的信噪比。为了减少这些干扰，需要研究其干扰方式，从而采取相应措施提高传感信号信噪比，保证后续的焊缝图像处理快速性和可靠性。

本章首先在分析结构光视觉传感器原理的基础上建立其数学模型，应用光度学理论推导视觉传感器弧光干扰模型，分析弧光对视觉传感信号的影响，并通过实验优化视觉传感器的参数。

### 2.2 结构光视觉传感器工作原理

线结构光视觉传感器是一种轮廓传感器，主要用于测量定点位置、法向截面尺寸以及棱边位置等，它主要由光源(激光二极管或半导体激光器等)和光电探测器(CCD 摄像机等)以及镜头、带通滤光片、圆柱透镜等辅助元件组成，其中摄像机和光源成一已知角度  $\beta$  固定于焊缝上方<sup>[68]</sup>。该方法可以直接获取焊缝的二维半信息。结构光传感器工作时，半导体激光器发出的光经圆柱透镜后变成一个平面光即线结构光照射到工件上，这样就在工件上形成一条宽度很窄的光带。当该光带被工件反射或散射后，经滤光片保留半导体激光器发出的特定波长的光，而把其它波长的光滤掉，最后进入摄像机成像。由于有角度  $\beta$  的存在，当光带照射到待焊工件时，由于各点的深度不同，因而通过镜头成像后，反射到摄像机上的位置就不同，即结构光光平面与工件表面的交线，进入摄像机成像为一条变形的光带，此时就可根据光带各点形变程度的不同计算出焊缝沟槽各点的深度。图 2-1 给出了结构光视觉传感器的结构原理图。

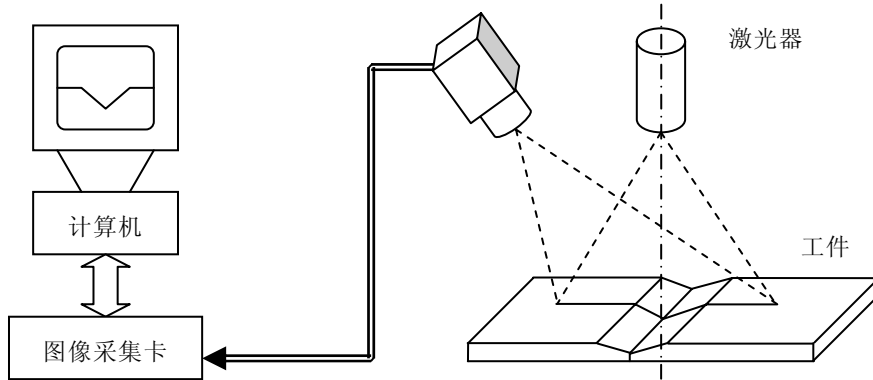


图 2-1 结构光视觉传感器结构原理图

Fig.2-1 The principle of the structured light visual sensor

## 2.3 结构光视觉传感器的数学模型

CCD 摄像机与半导体激光器是结构光视觉传感器的主要组成部分，二者的位置关系主要有以下三种方式：(1)光源倾斜照射，摄像机垂直接收；(2)光源倾斜照射，摄像机倾斜接收；(3)光源垂直照射，摄像机倾斜接收。

在实际的检测过程中可以根据具体情况和要求来选择究竟采用哪一种方式。目前，英国的 Meta 公司的 Meta Torch 系列焊接接头跟踪传感器采用的就是第一种方式，而瑞典 Selcom 公司的 Laser Track 和 Seam Finder 焊接接头检测和跟踪传感器则采用第三种方式。若采用光源倾斜照射的方法，要确定焊接接头垂直截面的形状和尺寸必须与前面的若干幅图像综合起来共同考虑，而不能直接根据摄像头所采集到的某一幅图像来确定，这给后续的焊缝跟踪算法带来了很大麻烦，因此，本文采用光源垂直于工件表面照射，摄像头倾斜接收的方式。

文献[69]从成像关系和立体几何的角度推出了结构光传感器的变换公式，考虑到通过采集和处理焊接接头的图像，提取焊接接头的特征点来完成焊缝焊接的实时跟踪，摄像机物距远大于焦距，因而假定摄像机模型为理想的针孔透视变换模型，不计透镜的畸变，可以满足系统的精度要求。建立如图 2-2 所示的线结构光视觉传感器的理想模型。

图 2-2 中， $O_l X_l Y_l Z_l$  为结构光坐标系，结构光坐标系中空间的一点  $P_l$  表

示为  $(x_l, y_l, z_l)$ ； $O_l X_l Y_l Z_l$  为摄像机的成像坐标系，其中心是光轴与图像平面的交点， $Z_l$  轴为光轴， $X_l$  轴和  $Y_l$  轴分别平行于图像平面的水平轴和垂直轴，三维空间的点  $P_i$  在摄像机的成像坐标系中表示为  $(x_i, y_i, z_i)$ 。视觉传感器工作时，由半导体激光器发出的线结构光沿  $Z_l$  轴垂直照射到工件表面，形成一条  $V$  型焊缝的光带曲线  $AO_l B$ ，摄像机相对于  $Z_l$  轴倾斜  $\beta$  角采集图像。光平面方程为  $x_l = 0$ ，且它与  $X_l O_l Y_l$  平面的交线为  $y$  轴。

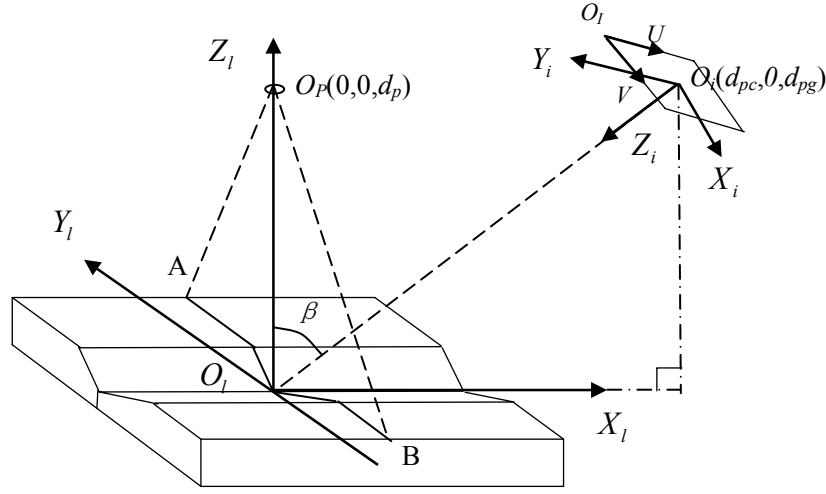


图 2-2 线结构光视觉传感器的数学模型

Fig.2-2 The model of the line structured light visual sensor

由光学和矩阵变换理论可知，通过正透视投影变换以及坐标的平移和旋转可以由摄像机坐标系中的坐标值  $(x_i, y_i, z_i)$  求得其在结构光坐标系中的坐标值  $(x_l, y_l, z_l)$ 。根据小孔成像和矩阵变换原理，将结构光坐标系中的光带曲线  $AO_l B$  变换到欧氏摄像机坐标系中有：

$$\bar{P}_i = H \cdot \bar{P}_l \quad (2-1)$$

式中  $\bar{P}_l$ ——物体上任意一点的广义矢量坐标，且  $\bar{P}_l = [x_l, y_l, z_l, 1]^T$ ；

$\bar{P}_i$ ——物体上的点成像到成像面上的广义矢量坐标，且

$$\bar{P}_i = [wx_i, wy_i, wz_i, w]^T。$$

变换矩阵  $H$  表示为

$$H = V \cdot R_y(\beta) \cdot R_x(180^\circ) \cdot T_i \quad (2-2)$$



透视变换矩阵：

$$V = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 & f \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

旋转矩阵：

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$R_x(180^\circ) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

平移矩阵：

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_{pc} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_{pg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

将式(2-3)、(2-4)、(2-5)、(2-6)代入式(2-2)得：

$$H = \begin{bmatrix} f \cos \beta & 0 & f \sin \beta & -d_{pc} f \cos \beta - d_{pg} f \sin \beta \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ f \sin \beta & 0 & -f \cos \beta & -d_{pc} f \sin \beta + d_{pg} f \cos \beta \\ \sin \beta & 0 & -\cos \beta & -d_{pc} \sin \beta + d_{pg} \cos \beta + f \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

将式(2-7)代入式(2-1)得：

$$\begin{bmatrix} wx_i \\ wy_i \\ wz_i \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cos \beta & 0 & f \sin \beta & -d_{pc} f \cos \beta - d_{pg} f \sin \beta \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ f \sin \beta & 0 & -f \cos \beta & -d_{pc} f \sin \beta + d_{pg} f \cos \beta \\ \sin \beta & 0 & -\cos \beta & -d_{pc} \sin \beta + d_{pg} \cos \beta + f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{bmatrix}$$

解得：

$$\begin{cases} x_i = \frac{fx_l \cos \beta + fz_l \sin \beta - d_{pc} f \cos \beta - d_{pg} f \sin \beta}{x_l \sin \beta - z_l \cos \beta - d_{pc} \sin \beta + d_{pg} \cos \beta + f} \\ y_i = -\frac{f}{x_l \sin \beta - z_l \cos \beta - d_{pc} \sin \beta + d_{pg} \cos \beta + f} \\ z_i = \frac{fx_l \sin \beta + fz_l \cos \beta - d_{pc} f \sin \beta + d_{pg} f \cos \beta}{x_l \sin \beta - z_l \cos \beta - d_{pc} \sin \beta + d_{pg} \cos \beta + f} \end{cases} \quad (2-8)$$

至此，便可以根据结构光坐标系中任意一点的坐标  $\bar{P}_l$  求得其成像到摄像机成像表面的位置坐标  $\bar{P}_i$ 。而在实际的研究工作中所要做的是根据摄像机所采集的数据来实时求取焊接接头的实际位置以完成焊缝的实时跟踪，亦即通过摄像机坐标系中的已知坐标值  $\bar{P}_i(x_i, y_i, z_i)$  得到其在水坐标系中的坐标值  $\bar{P}_l(x_l, y_l, z_l)$ ，用公式表示为：

$$\bar{P}_l = H^{-1} \cdot \bar{P}_i \quad (2-9)$$

式中  $\bar{P}_l = [wx_l, wy_l, wz_l, w]^T$ ， $\bar{P}_i = [x_i, y_i, z_i, 1]^T$

$$H^{-1} = \frac{1}{f^2} \begin{bmatrix} f \cos \beta & 0 & f \sin \beta - d_{pc} & fd_{pc} \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ f \sin \beta & 0 & -f \cos \beta - d_{pg} & fd_{pg} \\ 0 & 0 & -1 & f \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

将式(2-10)代入式(2-9)可得：

$$\begin{bmatrix} wx_l \\ wy_l \\ wz_l \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{f^2} \begin{bmatrix} f \cos \beta & 0 & f \sin \beta - d_{pc} & fd_{pc} \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ f \sin \beta & 0 & -f \cos \beta - d_{pg} & fd_{pg} \\ 0 & 0 & -1 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

解得：

$$\begin{cases} x_l = \frac{1}{f - z_i} (x_i f \cos \beta + fz_i \sin \beta - d_{pc} z_i + fd_{pc}) \\ y_l = -\frac{1}{f - z_i} fy_i \\ z_l = \frac{1}{f - z_i} (x_i f \sin \beta - fz_i \cos \beta - d_{pg} z_i + fd_{pg}) \end{cases} \quad (2-11)$$

消去  $z_i$  后得到图像的投影线方程为：

$$\begin{cases} x_l = -\frac{y_l(x_i \cos \beta + f \sin \beta) + y_i(f \sin \beta - d_{pc})}{y_i} \\ z_l = -\frac{y_l(x_i \sin \beta - f \cos \beta) - y_i(f \cos \beta + d_{pg})}{y_i} \end{cases} \quad (2-12)$$

图像的投影线方程与光平面方程相交，得到的便是焊缝接头处的横截面。已知光平面方程为  $x_l = 0$ ，求得  $x_l = 0$  截面内的  $y_l$ ， $z_l$  坐标值，便得到了焊缝接头的横截面方程：

$$\begin{cases} x_l = 0 \\ y_l = -\frac{f \sin \beta - d_{pc}}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} y_i \\ z_l = \frac{x_i(f + d_{pg} \cos \beta - d_{pc} \sin \beta) + f(d_{pg} \sin \beta + d_{pc} \cos \beta)}{x_i \cos \beta + f \sin \beta} \end{cases} \quad (2-13)$$

## 2.4 弧光干扰模型的建立

在焊接接头自动跟踪系统中，焊接接头位置和形状的检测是一个非常关键的问题，由于有强烈的电弧光、焊接火花和飞溅以及熔池金属的影响，给焊接接头图像的检测和处理带来了很大困难。为此对这种干扰进行仔细分析，建立其光照模型，对检验处理软件的有效性、确定处理算法以及对结构光视觉检测传感器的设计都有非常重要的意义。

在电弧焊接过程中主要的干扰源有强烈的电弧光、焊接时通过摄像机视场的火花和飞溅、以及熔化金属所产生的辐射等。在焊接过程中电弧中心附近的温度可达10 000 K 以上，而飞溅的金属液滴与之相比温度要低得多，因此它们的辐射能量大多数在波长为1000 nm 以上的范围内；摄像机在焊枪的前方，一般来说熔池不在其视场范围之内，另外，熔池所辐射的能量大多数也在1000 nm 波长以外；尽管保护气体发出的等离子体的温度可高达6000 K，但是它的辐射系数很低，在可见光范围内和近红外波长范围内的

辐射并不太强。因此电弧光是最主要的干扰噪声。图 2-3 为焊接接头检测的示意图。

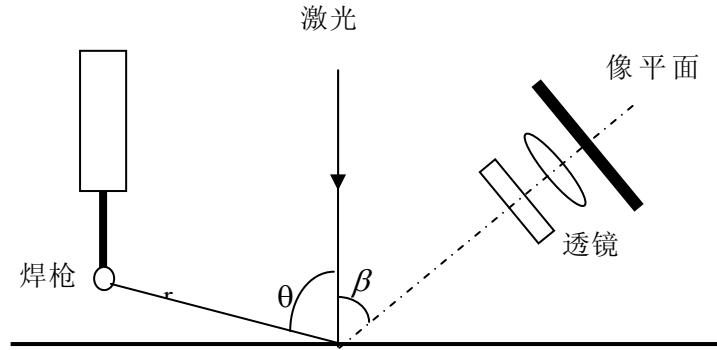


图 2-3 焊接接头检测示意图

Fig.2-3 Diagram of joint detection

由于在焊接电弧中温度很高部分的有效面积  $A$  很小 ( $0.5\text{mm}^2$  左右), 它与电弧中心到工件之间距离的平方 ( $r^2$ ) 相比要小得多, 即  $A/r^2 \ll 1$ , 因此, 可以把焊接电弧看作是一个点光源。根据点光源照度的距离平方反比定律以及光度学中照度余弦定则, 被照点处的光照度为:

$$E(\lambda) = I(\lambda) \frac{\cos \theta}{r^2} \quad (2-14)$$

式中  $E(\lambda)$ ——电弧光的光照度;

$I(\lambda)$ ——电弧光的发光强度, 可近似认为是常数;

$R$  ——电弧中心与视场内被照点的距离;

$\theta$  ——电弧中心与视场内被照点连线和基体表面法线之间的名义入射角度。

电弧可看作是黑体光源, 根据普朗克定律, 黑体的光照度为:

$$I(\lambda) = AL_{arc}(\lambda) = A\varepsilon(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right]} \quad (2-15)$$

式中  $L_{arc}(\lambda)$  ——电弧光的光亮度;

$\varepsilon(\lambda)$  ——电弧辐射系数;

$H$  ——普朗克常数;

$c$  ——真空中的光速;

$k$  ——Boltzman 常数;

$t$  ——电弧温度；

$A$  ——电弧有效发光面积。

这样，在投射点处电弧光产生的光照度为：

$$E(\lambda) = AL_{arc}(\lambda) \frac{\cos \theta}{r^2} \quad (2-16)$$

该电弧光照到工件表面上后，被工件表面所反射和散射，设表面作用系数为：

$$f_r = f_{rd} + f_{rs} = \frac{L_{arc}(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (2-17)$$

式中  $f_r$  ——表面作用系数；

$f_{rd}$  ——表面漫反射作用系数，根据 Lambertian 模型，可看作常数；

$f_{rs}$  ——表面全反射作用系数，与表面不平度、光波波长等有关。

由此可以得出在摄像机视场范围内反射的电弧光的光亮度为：

$$L_r(\lambda) = f_r E(\lambda) = \frac{A}{r^2} f_r L_{arc}(\lambda) \cos \theta \quad (2-18)$$

该反射电弧光再通过一个中心波长为  $\lambda_c$  通带宽为  $B_w$  的干涉滤光片进行滤波，以减小电弧光的干扰。滤光片的作用函数为：

$$F_G(\lambda - \lambda_c) = t_r e^{-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-19)$$

式中  $\sigma$  ——  $0.2B_w$ ；

$t_r$  ——峰值透射系数。

经滤光片后的电弧光再经过摄像机的镜头，最后成像在像平面上，如图 2-4 所示。

假设  $ds$  为光轴上垂直于光轴的小面元，经镜头的透镜系统后所成的像为  $ds'$ ， $P_1P_2$ 、 $u$ 、 $\Delta\Omega$  分别为透镜系统的入瞳、入射孔径角和入瞳对  $ds$  的中心所张的立体角； $P_1'P_2'$ 、 $u'$ 、 $\Delta\Omega'$  分别为透镜系统的出瞳、出射孔径角和出瞳对  $ds$  的中心所张的立体角。 $L$  和  $L'$  分别为物面元  $ds$  和像面元  $ds'$  的亮度。

来自面元  $ds$  在与光轴成  $\theta$  角方向  $d\Omega$  立体角内的光通量为：

$$d^2\Phi = Lds \cos \theta d\Omega \quad (2-20)$$

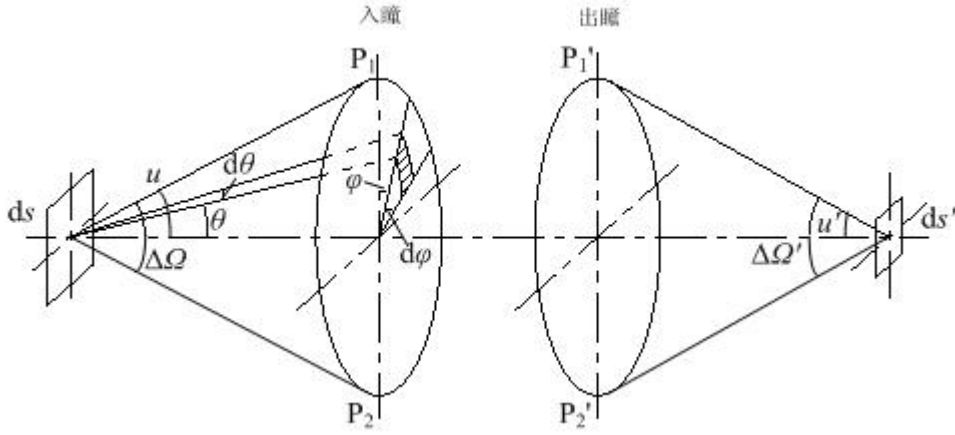


图 2-4 摄像机透镜工作示意图

Fig.2-4 Diagram of camera lens working

由于面元  $ds$  可以看作余弦发射体,  $L$  与方向无关, 因此  $ds$  在  $\Delta\Omega$  立体角内进入系统的光通量为:

$$d\Phi = Lds \int_{\Delta\Omega} \cos\theta d\Omega \quad (2-21)$$

因为

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2-22)$$

所以

$$\begin{aligned} d\Phi &= Lds \int_{\theta=0}^u \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \\ &= \pi Lds \sin^2 u \end{aligned} \quad (2-23)$$

相应的光照度为:

$$E = \frac{d\Phi}{ds} = \pi L \sin^2 u \quad (2-24)$$

同样可得在立体角  $\Delta\Omega$  范围内投射到像面元  $ds'$  上的光通量为:

$$d\Phi' = \pi Lds' \sin^2 u' \quad (2-25)$$

进入光学系统的光通量  $d\Phi$ , 考虑被媒体吸收、散射和界面的反射, 实际到达像面的光通量为:

$$d\Phi' = k_1 d\Phi \quad (2-26)$$

式中  $k_1$ ——光学系统的透射系数, 与波长有关的小于 1 的正的系数。

由式 (2-22)、(2-24) 和 (2-25) 得：

$$L' = k_1 \frac{ds}{ds'} \frac{\sin^2 u}{\sin^2 u'} L \quad (2-27)$$

设物和像的大小分别为  $y$  和  $y'$ ，物空间和像空间的折射率分别为  $n$  和  $n'$ ，且系统满足正弦条件：

$$ny \sin u = n'y' \sin u' \quad (2-28)$$

而

$$\frac{ds}{ds'} = \frac{y^2}{y'^2} \quad (2-29)$$

由式 (2-27)、(2-28) 和 (2-29) 可得：

$$L' = k_1 L \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \quad (2-30)$$

这样，在像元  $ds'$  上产生的照度为：

$$E' = \frac{d\Phi'}{ds'} = \pi L' \sin^2 u' = k_1 \pi L \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \sin^2 u' \quad (2-31)$$

对于摄像机来说，一般情况下其物距远远大于焦距，这时即使物体的位置在很大范围内改变，像平面也总是在像方焦距附近，出射孔径角  $u'$  近似是常数。在这里摄像机的光学系统可看作是一个薄透镜，孔径光阑和光瞳就可以被视为透镜本身，若透镜直径为  $D$ ，像方焦距为  $f'$ ，那么：

$$\sin u' = \frac{D}{2f'} \quad (2-32)$$

因此

$$E' = \frac{k_1 \pi L}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \quad (2-33)$$

式中  $f'/D$  ——相对孔径的倒数，叫做  $F$  数。

由于在实际使用时物空间与像空间的介质相同，因此  $n'/n=1$ ，而且可认为  $f'=f$ ，所以：

$$E' = \frac{k_1 \pi L}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \quad (2-34)$$

假设像平面上各像点对应的光束都充满出瞳，即无渐晕，光轴与透镜中心和基体金属上反射点之间的夹角为  $\beta$ ，那么轴外像点周围的实际光照度

$E'_\beta$ 为:

$$E'_\beta = E' \cos^4 \beta \quad (2-35)$$

而在实际的光学系统中通常都存在斜光束渐晕, 假设渐晕系数为  $k_2$ , 则:

$$E'_\beta = k_2 E' \cos^4 \beta \quad (2-36)$$

结合式(2-18), 实际到达像平面的光照度为:

$$\begin{aligned} E'_\beta &= k_2 \cdot \frac{k_1 \pi L_r(\lambda)}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cos^4 \beta \\ &= \frac{k_0 \pi A}{4r^2} \left(\frac{D}{f}\right)^2 f_r L_{arc}(\lambda) \cos^4 \beta \cos \theta \end{aligned} \quad (2-37)$$

式中  $k_0$ ——系数,  $k_0=k_1k_2$ 。

因此, 反(散)射光经滤光片和透镜后到达像平面上的光照度为:

$$E''(\lambda_c) = \frac{k_0 \pi A}{4r^2} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cos^4 \beta \int_0^\infty f_r L(\lambda) F_G(\lambda - \lambda_c) \cos \theta d\lambda \quad (2-38)$$

再经过图像传感器件将光照度  $E$  转换成灰度级  $G$  为:

$$G(\lambda_c) = p E''(\lambda_c)^\gamma \quad (2-39)$$

式中  $p$  ——比例常数;

$\gamma$  ——摄像机的特性系数。

将式(2-38)代入式(2-39)得:

$$G(\lambda_c) = p \left[ \frac{k_0 \pi A}{4r^2} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cos^4 \beta \right]^\gamma \left[ \int_0^\infty f_r L(\lambda) F_G(\lambda - \lambda_c) \cos \theta d\lambda \right]^\gamma \quad (2-40)$$

式(2-40)即为焊接过程中弧光噪声对视觉传感器图像的干扰模型。

## 2.5 结构光视觉传感器结构参数的确定

在弧焊过程中产生的强烈弧光、热辐射、飞溅、烟尘及工件表面对弧光和激光的二次反射进入视觉传感区域, 使视觉传感器输出的焊缝图像混入大量干扰噪声, 给后续的提取焊缝特征信息的图像处理过程的难度大大增加。



为了减轻图像处理过程的计算负担，以快速、可靠地提取焊缝特征信息，在视觉传感器设计过程中，针对各种干扰噪声以及结构光的特点，通过适当选取关键器件的参数，优化传感器结构，最大限度地抑制噪声干扰，提高视觉传感图像信噪比，对提高整个焊缝跟踪系统的性能和可靠性具有重要意义。

### 2.5.1 半导体激光器和滤光片的选择

在弧焊过程中不可避免要产生强烈的弧光，在设计结构光视觉传感器时要采用滤光片来减小弧光的干扰，这就要研究弧光光谱分布，以使激光的中心波长避开弧光光谱的峰值，减小弧光对激光光带的影响，得到信噪比较好的视觉传感图像。

文献[44]对 MIG 焊接过程中不同焊接电流时的弧光光谱进行了详细的测定，并指出在波长为 150-200nm、590-650nm 和 890-935nm 三段范围内，弧光光强较小，为视觉传感器可用范围。

中心波长分别为 467nm、594nm、610nm、635nm、950nm 的激光二极管具有较大的输出功率，可以用来作为结构光视觉传感器的照射光源。而 CCD 摄像机的光谱响应曲线如图 2-5，可以看出在波长 400-650nm 摄像机有较大的响应。基于以上分析本课题研究中选用中心波长 635nm、功率 30mW 的红光半导体激光器。

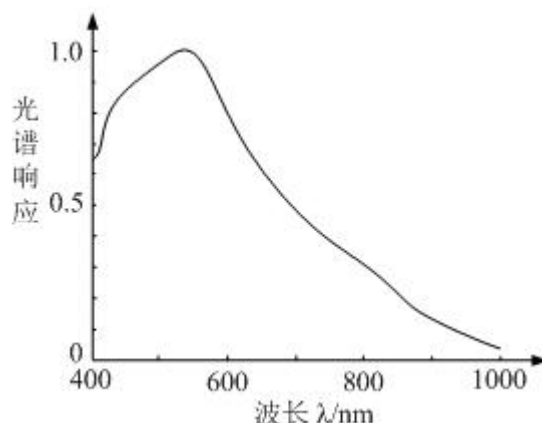


图 2-5 CCD 摄像机光谱响应曲线

Fig.2-5 Spectrum curve of CCD camera

为了只让激光光带波长的光进入摄像机，在摄像机的镜头前安装带通滤光片，其中心波长为 635nm，带宽 $\pm 10$ nm。

### 2.5.2 摄像机倾斜角度的确定

根据弧光对视觉传感器干扰模型式(2-40)可以得出电弧中心与视场内被照点的距离  $r$  与灰度的关系曲线如图 2-6，以及光轴与透镜中心和基体金属上反射点之间连线的夹角  $\beta$  与灰度的关系曲线图 2-7。

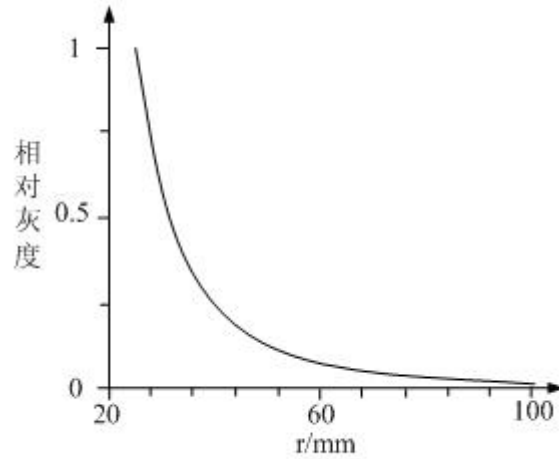


图 2-6 相对灰度与  $r$  的关系曲线

Fig.2-6 Curve of relative gray level vs  $r$

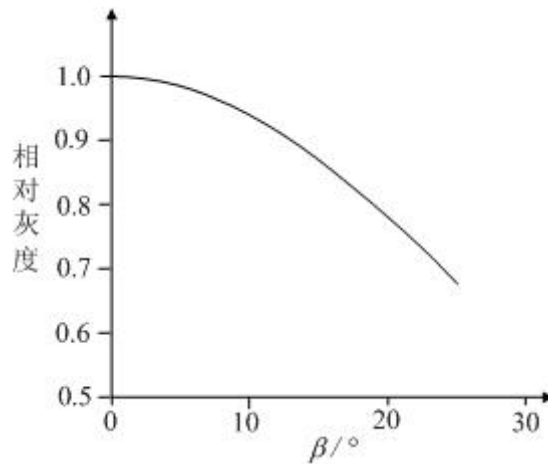


图 2-7 相对灰度与  $\beta$  的关系曲线

Fig.2-7 Curve of relative gray level vs  $\beta$

由图 2-6 可以看出，随着电弧中心与视场内被照点距离  $r$  的减小，电弧光的影响作用越来越大， $r=25\text{mm}$  时的影响要比  $r=50\text{mm}$  时的大 8 倍，要比  $r=100\text{mm}$  时的大 60 多倍。因此适当地选择摄像机的视场与焊枪的距离，对

减小电弧光的影响具有非常明显的效果。从这个意义上讲，光带距离电弧中心越远越好。然而，光带超前电弧中心的距离增大，会增加跟踪误差。所以，应综合这两方面的因素来确定光带超前电弧的距离。

由图 2-7 可以看出，随着光轴与透镜中心和基体金属上反射点之间夹角 $\beta$ 的加大，在同样光照度的作用下，边缘处的灰度要比中心处的低，当 $\beta$ 增大到  $25^\circ$ 时，边缘处的灰度比中心处的减小 20%以上。这种作用对电弧光来说关系并不大，但是由于对激光光带来说，这种作用同样也存在，因此将对成像质量产生很大的影响。为此，为了保证良好的成像质量，应使 $\beta$ 在  $15^\circ$ 范围内，这样可以使中心与边缘的灰度之差在 10%以内。

基于以上分析，应选择合适的摄像机镜头，选取适当的工作视野和摄像机视野与工作表面的距离。

通过实验确定 $\beta$ 的具体值。实验中采用  $\text{CO}_2$  气体保护焊焊接，接头形式为 V 形焊缝。为了减小飞溅对传感器的破坏作用，一般视觉传感器要加上飞溅防护板。实验中还考察了有无飞溅防护板对传感器摄取图像的影响。图 2-8 为视觉传感器与焊枪组成的实验系统照片。激光光带垂直于管道表面，改变摄像机光轴与光带之间的夹角摄取实际焊接的传感图像。

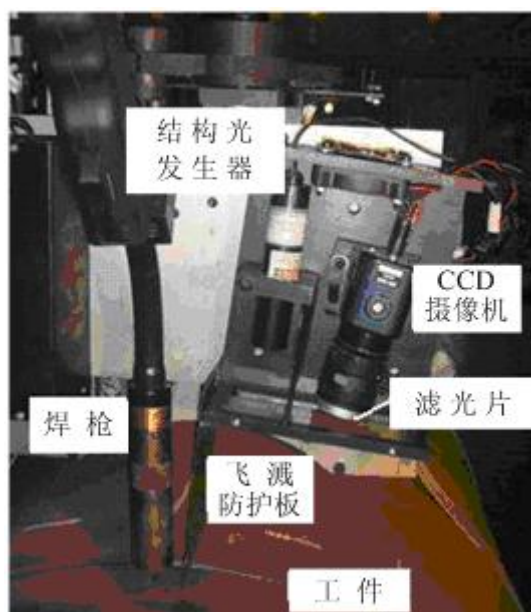


图 2-8 弧光影响实验系统图片

Fig.2-8 Picture of experiment system for arc noise

实验中固定光带至电弧中心的距离  $r=40\text{mm}$ ，令 $\beta$ 分别等于  $0^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $15^\circ$ ，并在有无飞溅防护板的情况下，采集两组图像以作比较。图 2-9 为有

飞溅防护板的焊缝图像，而且飞溅防护板与管道表面间隙小于 1mm。图 2-10 为无飞溅防护板条件下不同 $\beta$ 角的焊缝图像。

由图 2-9 可以看出，由于飞溅防护板与管道表面间隙很小，将焊缝以外的飞溅与弧光的大部分与摄像机隔离，然而管道壁厚较大，V 形坡口较深，焊缝中的弧光与飞溅仍然很强烈，因而使激光光带附近焊缝与管道表面的光强相差极大。焊缝处反射的弧光、飞溅与激光光带均使 CCD 达到饱和，其灰度值均为 255，在焊缝图像中无法区分。比较采用不同的 $\beta$ 值时的图像，当 $\beta = 7^\circ$ 时，激光光带的图像较其它两图清晰。

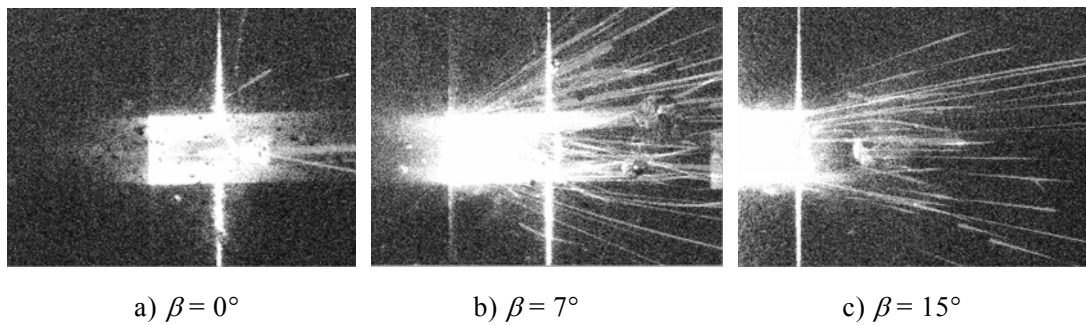


图 2-9 有飞溅防护板的焊缝图像

Fig.2-9 Image of vision sensor with isolator

由图 2-10 可以看出，当不装飞溅防护板时，弧光强烈，其亮度与激光光带的亮度相当，而激光光带亮度与弧光反射亮度相比较小，由于 CCD 摄像机本身具有自动增益控制功能，得到较清晰的激光光带图像。比较采用不同的 $\beta$ 值时的图像，当 $\beta = 7^\circ$ 时，激光光带的图像最清晰。

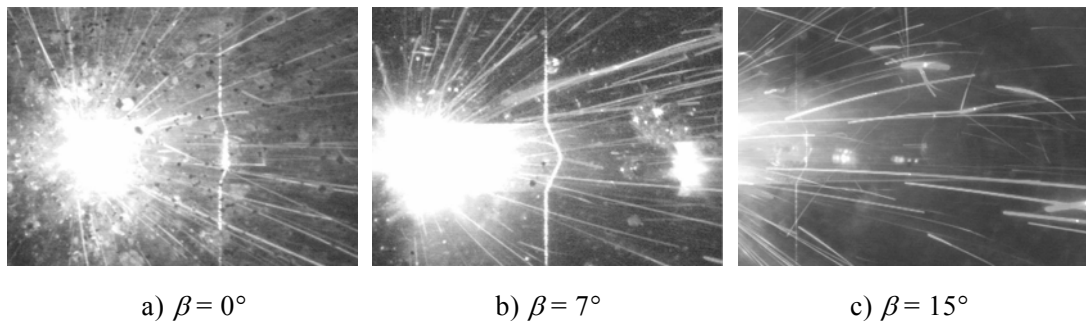


图 2-10 无飞溅防护板的焊缝图像

Fig.2-10 Image of vision sensor without isolator

这样，确定了 $\beta = 7^\circ$ ，并且飞溅防护板距离管道表面距离应加大至 10mm 左右。

## 2.6 本章小结

本章应用透视成像原理通过坐标变换推导出结构光视觉传感器的模型，给出被检测物体与摄像机成像面之间的坐标变换公式。与成像法相比较，该模型原理简洁、参数意义明显。

应用光度学理论，结合光学成像系统与带通滤光片的作用，建立了电弧光对视觉传感器信号干扰模型，给出结构光传感位置与电弧距离  $r$  和摄像机与结构光平面夹角  $\beta$  与摄像机图像灰度曲线关系，对结构光视觉传感器的结构设计具有指导意义。在该模型的指导下，并通过实验具体确定结构光传感器摄像机结构参数，减小了电弧干扰从而提高了视觉传感器图像质量。

## 第3章 焊缝图像处理

### 3.1 引言

焊缝图像处理方法一般包括量化、图像预处理、图像识别等步骤，以获取焊缝位置的精确位置。为了保证焊接质量，要求视觉传感与闭环控制、焊接的路径规划与姿态控制等都具有很强的实时性和很高的控制精度。常用的面阵光学传感器的信息处理频率都较低，有时很难满足焊接过程实时性的要求，通常不得不牺牲控制精度以提高处理速度。为此必须解决视觉传感系统的实时性与精确性的矛盾。

在焊缝的图像处理与边缘检测方面，研究根据所跟踪的特定对象，采用不同处理方法的组合提高处理速度和检测精度。虽然焊缝图像可以由视觉传感器直接获取，但是图像中带有弧光、飞溅等多种的噪声，要从焊缝图像中精确识别焊缝一直是具有挑战性的课题。Satoru 等人采用自适应函数的概念提出一种识别算法，但是并未给出焊缝识别的实际方法<sup>[70]</sup>。Neipold 等人采用线性回归算法来检测焊缝并估计焊缝的截面信息，他们设计图像处理装置 PASS(Programmable Adaptive Sensor System)由获取的焊缝图像来确定焊缝的几何信息(位置、尺寸、形状)或其他感兴趣的特征<sup>[71]</sup>。Kovacevic 等人由熔池内部某点向外放射状计算灰度的方向梯度，来检测焊缝边缘。Sugitani 等人对焊枪前 100mm 的图像做平滑再微分处理以识别焊缝。陈善本等人利用亚像素技术和基于泽尔尼克矩的算法提取熔池边缘，提高焊缝位置提取精度<sup>[72]</sup>。未来的发展趋势是采用智能图像处理算法以及融入新型的数学理论(如分形理论、数学形态学、图像质心算法等)来提高焊缝图处理速度和精度。

由于焊接环境的恶劣性，采用 CCD 摄像机直接摄取的原始焊缝图像中包含着很多的干扰。为了消除各种干扰的影响，获得理想的图像，必须对图像进行相应处理，产生计算机易于识别和理解的图像，从中提取所需特征参数。焊缝图像处理系统如图 3-1 所示：

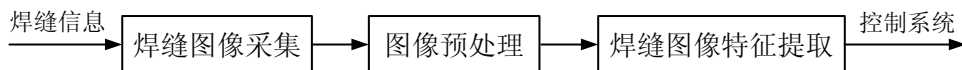


图 3-1 焊缝图像处理系统

Fig.3-1 The welding image processing system

结构光传感器图像的最大特点是激光发射的光带是结构化的，因此在结构光视觉传感器图像处理过程中可以采用特定处理方法快速提取光带图像。

### 3.2 焊缝图像的预处理

图像预处理是在处于最低抽象层次的图像上所进行的操作，这时处理的输入和输出都是亮度图像。这些图标图像(Iconic image)是图像的最底层表示，由含有原始数据的图像组成，通常是用图像函数值的矩阵表示的亮度图像。预处理不会增加图像的信息量，而且如果用熵来度量信息，预处理则会降低图像的信息量。因此，进行预处理的目的是要根据特定条件下的采取相应的处理方法，以最大程度去除噪声，保留甚至增强图像中的特定信息的过程。

虽然视觉传感器已采取抑制噪声的措施，在焊接过程中实时采集图像仍不可避免地受到电弧光、焊接烟尘、飞溅以及熔池金属的辐射等影响，无法直接检测到所需的焊缝特征信息。因而焊缝图像的预处理，即是针对焊缝原始图像的特点，最大限度地消除噪声，快速获得清晰激光光带条纹图像的过程，为后续焊缝特征提取打下基础。本课题研究中，焊缝图像预处理的过程框图如图 3-2 所示：

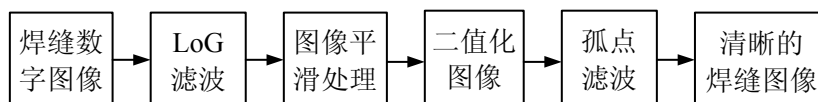


图 3-2 焊缝图像预处理过程框图

Fig.3-2 The flow chart of the seam image preprocessing

#### 3.2.1 焊缝图像的滤波

焊接环境的恶劣性决定了通过结构光视觉传感器获取的焊缝图像存在着大量干扰噪声。通过对大量焊缝原始图像的分析，可以得知弧光、烟尘噪声在图像中表现为大块噪声图像，而飞溅滑过的路径表现为与激光光带成角度的光条。为了尽可能多地消除这些噪声，而且尽量减小对有用的激光光带产生不良影响，选择的滤波器应具有如下两个特点：滤波器应在光带截面的中心点处具有最大的响应；滤波器应能把激光光带与可能存在的干扰噪声分离出来，比如弧光闪烁、焊接飞溅和激光的多次反射等所引起的干扰，而 LoG (Laplacian of Gaussian) 滤波器就具有这样的特点<sup>[73]</sup>。

LoG 滤波器是对高斯平滑后的图像  $f(x, y)$  (用卷积  $*$  来表达) 的 Laplacian, 即  $\nabla^2[G(x, y, \sigma) * f(x, y)]$ , 因为所涉及算子的线性特征, 微分和卷积运算的顺序可以交换为  $[\nabla^2 G(x, y, \sigma)] * f(x, y)$ 。

2D 高斯平滑算子  $G(x, y)$  (即高斯滤波器), 可以由式(3-1)给出:

$$G(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3-1)$$

其中  $x, y$  是图像坐标,  $\sigma$  是关联的概率分布的标准差, 决定了其开口范围的大小。高斯平滑可以有效地抑制距离当前像素  $3\sigma$  范围内的所有像素的影响, 对高斯函数取拉氏变换, 则得二维 LoG 滤波器的函数形式为:

$$\nabla^2 G(x, y) = \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left( \frac{x^2+y^2}{\sigma^2} - 2 \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3-2)$$

由此可见, 可以将 LoG 滤波器看作由一个兴奋中心区和一个抑制性周边区组成。用该 LoG 滤波器对输入图像  $f(x, y)$  进行卷积运算后输出为:

$$\begin{aligned} F(x, y) &= \int_{\alpha=-\infty}^{+\infty} \int_{\beta=-\infty}^{+\infty} \nabla^2 G(\alpha, \beta) I(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^4} \int_{\alpha=-\infty}^{+\infty} \int_{\beta=-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{x^2+y^2}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} I(x-\alpha, y-\beta) - 2e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} I(x-\alpha, y-\beta) \right] d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (3-3)$$

由计算结果可看出, 如果选择合适的  $\sigma$  值, 就可以使得正项值的作用区域恰好与光带的宽度相等, 保证该滤波器在光带的中心位置具有最大响应, 同时抑制周边区域像素的影响。对于宽度恒定的目标图像而言, 如果采用 LoG 算子进行滤波, 可以很好的滤除那些宽度不等于目标图像宽度的噪声<sup>[54]</sup>。因而 LoG 滤波器可以滤除焊缝图像中的大量弧光闪烁、焊接飞溅和激光光带的多次反射所产生的干扰光噪声, 因为这些噪声的宽度通常要比激光光带的恒定宽度大很多。

然而采用二维 LoG 滤波器来平滑图像计算量大, 耗时长, 不满足焊缝实时跟踪的要求, 又由于结构光图像中的激光光带通常都是平行于图像的行或列, 因而为简化计算, 决定采用一维 LoG 滤波器来处理图像。一维 LoG 滤波器的函数形式为:

$$G(x, y) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3-4)$$



将其离散处理后得：

$$L(x) = \begin{cases} 1 & -\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{3w}{2} - 1 \leq x \leq -\frac{w}{2} - 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{w}{2} + 1 \leq x \leq \frac{3w}{2} + 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3-5)$$

式中  $w$ ——激光光带的宽度。

用  $L(x)$  函数作用于输入图像  $I(x, y)$  的各列，则得输出结果为

$$\begin{aligned} F(x, y) &= \sum_{m=-\frac{3w}{2}-1}^{\frac{3w}{2}+1} A_m I(x, y+m) \\ &= -\frac{1}{2} I\left(x, y - \frac{3w}{2} - 1\right) - \frac{1}{2} I\left(x, y - \frac{3w}{2}\right) \cdots - \frac{1}{2} I\left(x, y + \frac{3w}{2} + 1\right) \end{aligned} \quad (3-6)$$

式中  $A_m$ ——权值。

当激光光带的宽度  $w = 2$  时，用模板表示如下：

$$\left[ -\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad -\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2} \right]^T \quad (3-7)$$

采用该模板处理 V 形焊缝图像得到的结果如图 3-3 所示，通过比较图 3-3 a) 和图 3-3 b) 可以看出原始图像中的干扰噪声得到了很好的抑制，且减少了焊缝图像处理的计算量。

### 3.2.2 焊缝图像的平滑

经过一维 LoG 滤波器处理后的图像与激光光带接近垂直的噪声大部分被滤除，但是也使激光光带的图像出现了很多斑点。为了使光带图像连续需要进行平滑增强处理。

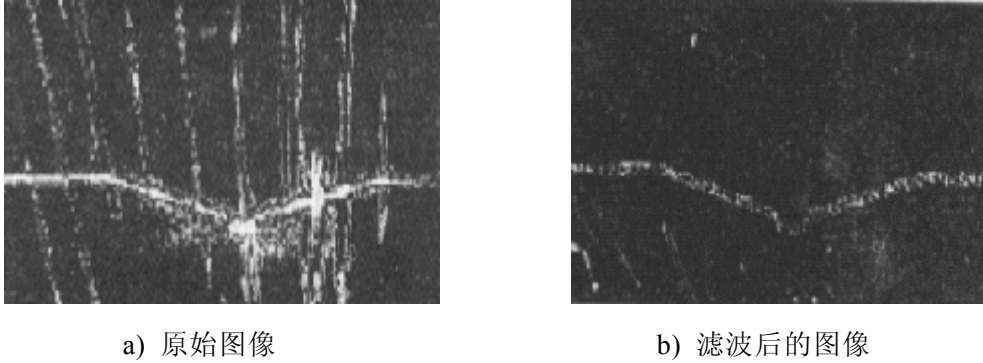


图 3-3 LoG 滤波处理后的图像

Fig.3-3 The image processed with the LoG filter

平滑(滤波)和增强处理，主要的方法有频域法和空域法。频域法是基于傅立叶变换的，是通过对图像进行傅氏变换，然后选取适当的频域带通滤波器进行滤波，之后进行傅氏反变换获得去除噪声后的图像。这种方法对于周期性较强的噪声较为有效，但是在处理过程中，由于难于区分与噪声频率相近的图像信息，容易造成大量图像信息的损失，而且频域法计算量较大，在实时图像处理中考虑到速度因素而很少采用。空域法是直接对图像像素进行处理，以达到抑制或消除图像噪声或其它小的波动的目的，主要有邻域均值滤波、中值滤波、模板匹配等方法。

**3.2.2.1 邻域均值滤波法** 邻域均值滤波是用窗口像素的灰度平均值代替窗口中心的像素灰度值。

如果被讨论像素的灰度值为  $F(j,k)$ ，以其为中心，窗口像素点集  $A$  内像素数为  $L$ ，经邻域均值滤波后，中心像素的灰度值为

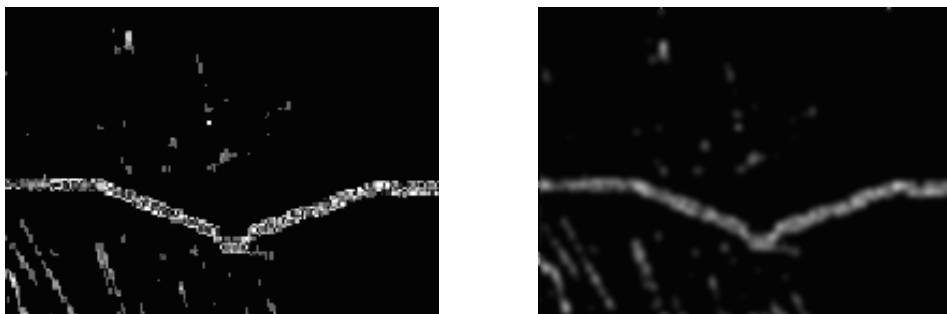
$$G(j,k) = \frac{1}{L} \sum_{(x,y) \in A} F(j,k) \quad (3-8)$$

以  $3 \times 3$  窗口为例，邻域均值滤波就是将图像中的一个像素的灰度值和它周围邻近 8 个像素灰度值相加，求平均值作为新图像中该像素灰度值。这时邻域均值滤波处理如式(3-9)的模板表示。

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

图 3-4 给出了焊缝图像经过  $3 \times 3$  邻域均值滤波后的效果，可见噪声得到了有效的抑制，但也造成了图像中灰度急剧变化的边缘一定程度的模糊。由

于邻域均值滤波没有考虑像素灰度和位置的关系，弱化了图像匹配条件，而且还造成了图像边缘的模糊，损失了部分微细边缘特征信息。



a) 处理前的图像

b) 邻域均值滤波后的图像

图 3-4 邻域均值滤波的结果

Fig.3-4 The result of neighborhood averaging filter

为了减少图像中灰度急剧变化的边缘模糊现象，需要对上述邻域均值法进行改进。

假设原图像中某点像素  $(x, y)$  的邻域  $S$  为  $m \times n$  的矩形窗口，其中  $m, n$  分别表示邻域  $S$  所包含的每行、每列的像素个数。则平滑后的像素  $(x, y)$  灰度值为：

$$G(x, y) = \begin{cases} \bar{F}(x, y) & |F(x, y) - \bar{F}(x, y)| > T \\ F(x, y) & \text{其它} \end{cases} \quad (3-10)$$

式中  $T$  ——给定的阈值。

平均值  $\bar{F}(x, y)$  为：

$$\bar{F}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(u, v) \in S} F(u, v) = \frac{1}{mn} \sum_{i=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{j=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} F(x+i, y+j) \quad (3-11)$$

这样将具有不同值的点看成是由噪声产生的，用周围点的灰度平均值来代替。当一些点的灰度值  $F(x, y)$  与平均值  $\bar{F}(x, y)$  差不超过规定的阈值时，仍然保留其原来的值以减少边缘模糊现象的产生。

**3.2.2.2 中值滤波法** 中值滤波是一种非线性平滑方法，它的中心思想是用邻域中亮度的中值代替图像当前点的亮度，即用窗口像素灰度中值代替要处理的像素灰度值。在一维情况下，中值滤波器不影响阶跃信号和斜坡信号，并可以有效地消除单、双脉冲，使三角形信号的顶端变平，对于干扰脉冲和

点状噪声有很好的抑制作用，能较好的保持图像边缘。

在一维形式下，中值滤波窗口是一个含有奇数个像素的滑动窗口，经排序后，窗口像素序列为  $\{F_{i-v}, \dots, F_{i-1}, F_i, F_{i+1}, \dots, F_{i+v}\}$ ，其中  $v = (N-1)/2$ ， $N$  为窗口长度， $F_i$  即为窗口像素的中值输出。记作：

$$G_i = \text{Med}\{F_{i-v}, \dots, F_{i-1}, F_i, F_{i+1}, \dots, F_{i+v}\} \quad (3-12)$$

式中  $\text{Med}\{\cdot\}$ ——表示取窗口中值。

由于在实际应用中处理的多是二维图像，因此很容易的将一维中值滤波推广到二维形式。取某种形式的二维窗口，如图 3-5 所示的线形、方形、十字形、圆形和菱形等，将窗口中的像素点按先行后列的顺序排成一维数列后，排序形成单调数列，再利用与一维中值滤波同样的方法求得二维中值输出  $G(j,k) = \text{Med}\{F_{jk}\}$ 。一般说来，二维中值滤波比一维中值滤波更能抑制噪声，而且不同形状的二维中值滤波器的滤波效果不同，方形或圆形窗口会使图像中的细线和显著的角点遭到破坏，因而适宜于外廓线较长的图像，而十字窗口则能够很好的保持水平或垂直的线条，适宜于尖顶形状图像的处理。

采用十字形窗口和方形窗口对焊缝图像进行平滑处理的结果，如图 3-6 所示。可以看出图像灰度变化边缘的模糊很小，但是噪声抑制效果不是很理想。

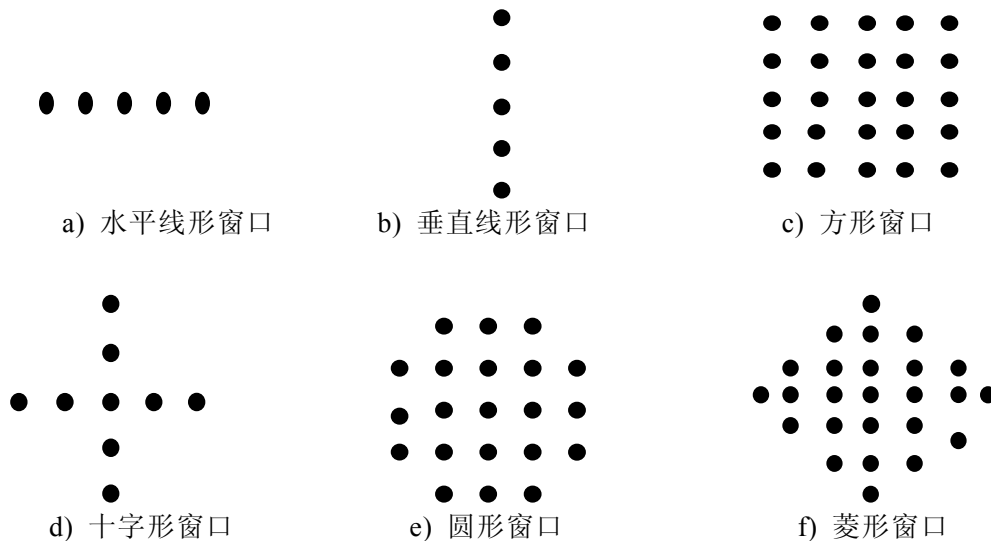


图 3-5 中值滤波常用窗口

Fig.3-5 The common windows of median filter

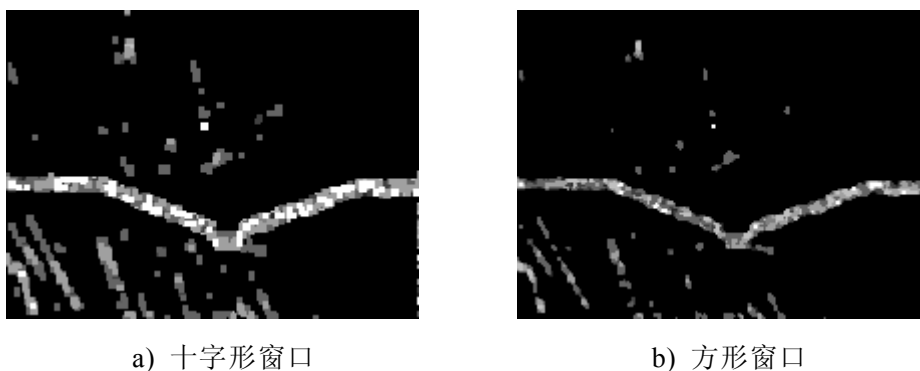


图 3-6 中值滤波的结果

Fig.3-6 The results of median filtering

**3.2.2.3 选择式掩模法** 选择式掩模法滤波就是将选定的模板在图像中漫游，并用选定的模板与图像中像素进行卷积运算求出每个模板的均值和方差，将方差值最小的模板所对应的均值作为所讨论像素点的灰度输出，这样既可以完成平滑处理，又不破坏区域边界的细节。

其具体实现步骤如下：取  $5 \times 5$  窗口，在窗口内取中心像素  $F(i, j)$  为基准点，制作 4 个五边形、4 个六边形、一个正方形共 9 个模板，如图 3-7 所示，中心点用黑点表示：

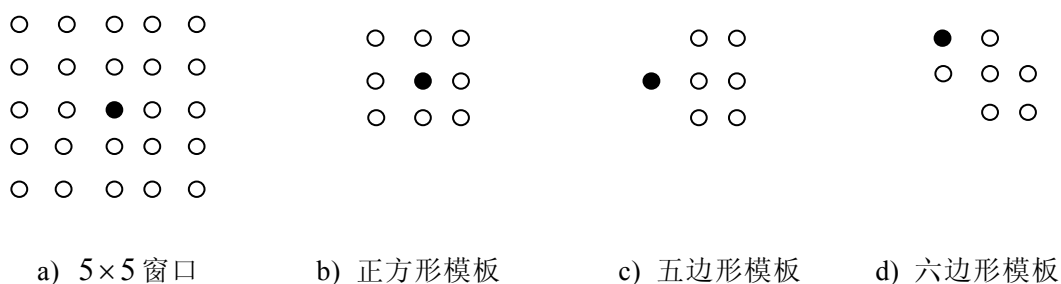


图 3-7 选择式掩模法模板

Fig.3-7 The templates of selective masking method

计算每个模板的均值  $a_i$  和方差  $\sigma_i$ ：

$$\begin{cases} a_i = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q f(j+m, k+n) \\ \sigma_i = \sum_{i=1}^Q \{ [f(j+m, k+n)]^2 - a_i^2 \} \end{cases} \quad (i=1,2,3,\dots,9) \quad (3-13)$$

式中  $Q$ ——模板元素个数；

$m, n$ ——掩模内像素  $(j, k)$  相对中心位置的位移量。

方差  $\sigma_i$  反映了掩模内像素灰度的均匀性， $\sigma_i$  越小，该掩模的灰度越均匀，那么点  $(j, k)$  属于该掩模的可能性越大。对 9 个方差排序，最小方差所对应均值即是  $f(j, k)$  的平滑输出。在这一假设的理论基础上，认为点  $(j, k)$  属于  $\sigma_i$  最小的掩模，存在两种情况：若  $(j, k)$  本属于边界上的点，那么用所在掩模的灰度均值代替  $(j, k)$  点灰度，将不会破坏边界清晰度；若  $(j, k)$  为一噪声点，采用这种方法将起到平滑作用。对于某窗口的灰度分布如图 3-8 的图像选择式掩模的算法实现如下例所示：

3	6	4	2	1
4	7	3	2	4
8	4	1	4	3
4	2	1	5	3
4	3	2	1	6

图 3-8 某窗口的灰度分布

Fig.3-8 Grey Distribution of a Window

经计算得：每个模板的均值  $a_i = \{a_1, a_2, \dots, a_9\} = \{4, 3, 3, 2, 4, 2, 3, 2, 3\}$  (左侧五边形为第一个模板，依次变换模板计算相应的均值)，相应的方差  $\sigma_i = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_9\} = \{54, 56, 17, 17, 24, 23, 0, 61, 44\}$ ，则  $\sigma_{\min} = \sigma_7$ ，所以该窗口中心像素的平滑输出值为 3。

采用掩模法对焊缝图像进行平滑处理的结果如图 3-9 所示。

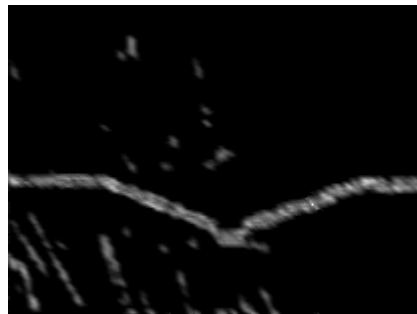


图 3-9 选择式掩模法滤波的结果

Fig.3-9 The result of selective mask filtering

分析比较上述几种平滑方法的处理结果可以看出：中值滤波虽然在图像

灰度变化边缘产生的模糊较小，但是对于干扰噪声比较敏感，处理效果不是很好。选择式掩模法不破坏区域边界的细节，也有较好的平滑效果，但是图像经过平滑后，图像的对比度下降，而且计算量大，对于一幅分辨率为  $400(H) \times 300(V)$  的图像进行平滑处理需要 0.05s。邻域均值滤波得到的图像在灰度急剧变化的边缘处有一定程度的模糊，但是噪声得到了很好的抑止，处理同样大小的图像仅需 0.01s，所以，综合考虑平滑效果与处理速度，本系统选用邻域均值滤波的方法实现焊缝图像噪声平滑。

### 3.2.3 焊缝图像的分割

图像分割就是将图像分成一些有意义的区域，然后对这些区域进行描述，相当于提取出某些目标区域图像的特征，判断图像中是否有感兴趣的目标。图像分割的基础是像素间的相似性和跳变性。所谓的相似性即某个区域内像素具有某种相似的特性，如灰度相等、纹理相同等；所谓的跳变性，指的是特性的不连续性，如灰度值突变等<sup>[74~76]</sup>。

图像分割的方法有很多种，常见的分割方法包括基于边缘检测的分割、基于区域的分割、基于边缘与区域相结合的分割等。基于边缘检测分割<sup>[77,78]</sup>的基本思想是先检测图像中的边缘，再按一定的策略连接成轮廓，从而构成分割区域，其难点在于边缘检测时抗噪性和检测精度的矛盾。基于区域分割的基本思想是根据图像数据的特征将图像空间划分为不同的区域。常见的区域分割方法有阈值法<sup>[79]</sup>、聚类法<sup>[80~82]</sup>、区域生长法<sup>[83,84]</sup>和松弛法<sup>[85]</sup>等，也都存在着各自的实现难点。边缘检测能够获得灰度或彩色值的局部变化强度，而区域分割能够检测特征的相似性与均匀性。阈值分割法处理速度快，可用于实时性要求较高的应用系统。本焊缝跟踪系统采用图像阈值分割法分割图像。

**3.2.3.1 阈值分割原理** 一幅图像一般包括对象物、背景还有噪声，怎样从多值的数字图像中只取出对象物，最常用的方法就是选择一个合适的阈值  $\theta$ ，通过判断图像中的每一个像素点的特征属性是否满足阈值的要求来确定图像中该像素点属于对象物还是应该属于背景，从而产生二值图像。即用阈值  $\theta$  将图像的数据分成两部分：大于  $\theta$  的像素集合和小于  $\theta$  的像素集合。用公式表示为：

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & f(i, j) \geq \theta \\ 0, & f(i, j) < \theta \end{cases} \quad (3-14)$$

式中  $f(i, j)$ ——输入图像；

$g(i, j)$ ——输出图像。

通常二值图像  $g(i, j)$  中的 1 表示目标子图，0 表示背景子图。灰度变换函数如图 3-10 所示。

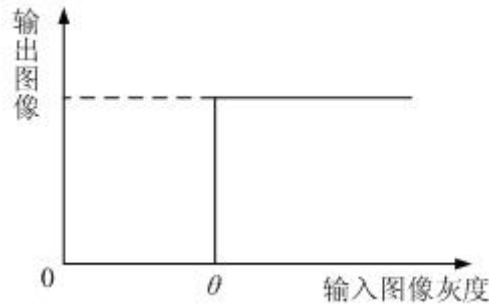


图3-10 二值化灰度变换函数

Fig.3-10 The gray transformation function of binary

公式(3-14)定义的基本阈值针对具有不同特征的图像有许多修正方法。其中的一种就是采用两个阈值，即  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ，把对象物轮廓部分特别窄的灰度范围当作 1 取出来，使对象的轮廓清晰，其输出图像  $g(i, j)$  为

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & \theta_1 \leq f(i, j) \leq \theta_2 \\ 0, & f(i, j) < \theta_1 \text{ 及 } f(i, j) > \theta_2 \end{cases} \quad (3-15)$$

灰度变换函数如图 3-11 所示，此方法对于直方图呈双峰形状的数字图像的分割效果更佳。

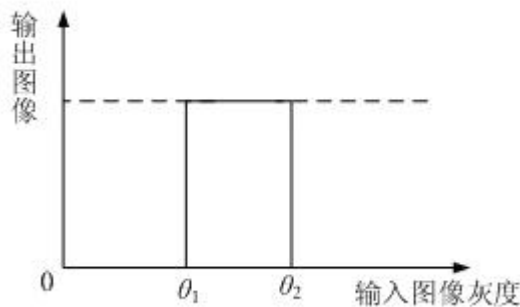


图3-11 轮廓线抽取灰度变换函数

Fig.3-11 The gray transformation function of extracting contour line

此外还有许多使用多阈值的阈值化修正方法，其处理后的结果图像不再是二值的，而是由一个有限的或无限的集合组成的图像  $g(i, j)$ ：



$$g(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } f(i,j) \in D_1 \text{ 时} \\ 2 & \text{当 } f(i,j) \in D_2 \text{ 时} \\ \cdots & \\ n & \text{当 } f(i,j) \in D_n \text{ 时} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3-16)$$

式中  $D_i$ ——第  $i$  个指定的灰度子集。

考虑到结构光焊缝图像的特点，一般可分为两个灰度范围：结构光光带(坡口)和背景物(工件)，而且图像的数据量非常大，为了得到一幅效果较好的数字化图像又要满足图像处理速度方面的实时性要求，选择相对较简单的采用一个阈值  $\theta$  的二值化方法。本课题所用的图像采集卡采用 8bit 的模数转换电路，采集的图像对应 256 级灰度，也就是说，灰度的取值范围为 0~255，其中 0 对应黑色，255 对应白色。这样灰度变换函数可以写成：

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) \geq \theta \\ 0, & f(x,y) < \theta \end{cases} \quad (3-17)$$

**3.2.3.2 阈值的选择** 在数字化的图像数据中，无用的背景数据和对象物的数据常常混在一起。另外，在图像中还会含有各种噪声，因此必须根据图像的统计性质，即从概率的角度来选择合适的阈值，即使这样也不可能将背景数据和对象物的数据绝对分开，它还与噪声的性质有关。

阈值的选择有手动选取和自动选择阈值两种方法。手动选取是人为的设定一个数值作为阈值，其确定阈值方法简单，但是在处理多幅图像时适应性较差，因为每幅图像的直方图不同，而不能只通过一幅图的直方图来确定阈值。焊缝跟踪系统中，由于弧光等干扰造成不同焊缝图像中灰度分布有较大差异，如果采用固定阈值分割图像效果较差，因此本系统采用自动选择阈值的方法。下面分析几种自动阈值选择的方法。

**(1) 差分直方图法** 把焊缝图像分成如图 3-12 所示的  $3 \times 3$  小区域，中心像素点的灰度值记为  $x_0$ ，其坐标为  $(i,j)$ ，其它各像素的灰度值记为  $x_1, x_2, \cdots, x_8$ ，这时中心像素点  $x_0$  的差分和定义为：

$$S_0 = \sum_{i=1}^8 (x_0 - x_i) \quad (3-18)$$

或 
$$S_1 = \sum_{i=1}^8 (x_i - x_0) \quad (3-19)$$

式中  $S_0$ ——正差分；  
 $S_1$ ——负差分。

$X_1$	$X_2$	$X_3$
$X_8$	$X_0$	$X_4$
$X_7$	$X_6$	$X_5$

图 3-12 图像的像素分割

Fig.3-12 Pixel segmentation of the image

具体的利用差分和求取阈值的方法为：扫描图像，对每一个  $2 \leq i \leq x-1, 2 \leq j \leq y-1$  的点  $(i, j)$  分别求差分  $S_{ij}$ ，差分值最大的点对应的灰度值为阈值。另外阈值和差分的形式有关，将正差分所得到的阈值  $\theta^+$  和负差分所得到的阈值  $\theta^-$  平均得  $\theta = (\theta^+ + \theta^-)/2$ ， $\theta$  便是阈值<sup>[86]</sup>。应用该阈值对焊缝图像进行二值化处理的结果如图 3-13 所示：

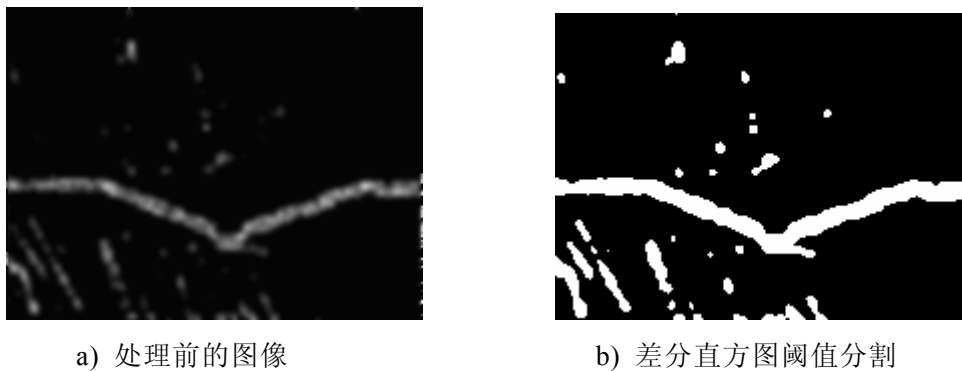


图3-13 差分直方图法分割结果

Fig.3-13 The segmentation result of difference histogram

(2) 迭代阈值分割法 图像分割阈值可以通过迭代的算法得到，即迭代阈值分割法<sup>[87]</sup>。使用迭代法求取阈值的基本思想是：先计算图像灰度直方图，选择图像灰度范围的中值作为初始阈值  $T_0$  (设共有  $L$  级灰度)，再按下列公式进行迭代：

$$T_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k \cdot k(i, j)}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k \cdot k(i, j)}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k} \right\} \quad (3-20)$$

式中  $k(i, j)$ ——图像上  $(i, j)$  点的灰度值；

$h_k$ ——灰度值为  $k$  值的像素个数<sup>[88]</sup>。

迭代阈值分割法的具体实现步骤为：

第 1 步：计算出图像中的最小和最大灰度值  $Z_l$  和  $Z_k$ ，令阈值初值：

$$T_0 = (Z_l + Z_k) / 2 \quad (3-21)$$

第 2 步：用阈值  $T_k$  将图像分割成目标图像和背景图像两部分，生成两组像素： $R_1$  由所有灰度值小于或等于  $T_k$  的像素组成，而  $R_2$  由所有灰度值大于  $T_k$  的像素组成。

第 3 步：对区域  $R_1$  和  $R_2$  中的所有像素计算平均灰度值  $\mu_1$  和  $\mu_2$ ：

$$\mu_1 = \frac{\sum_{k=0}^{T_k} h_k \cdot k(i, j)}{\sum_{k=0}^{T_k} h_k}, \quad \mu_2 = \frac{\sum_{k=T_k+1}^{L-1} h_k \cdot k(i, j)}{\sum_{k=T_k+1}^{L-1} h_k} \quad (3-22)$$

第 4 步：计算新的阈值： $T_{k+1} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$

第 5 步：如果  $T_{k+1} = T_k$ ，则结束，否则  $T_k \leftarrow T_{k+1}$ ，转到第 2 步。

利用迭代阈值分割法对焊缝图像进行分割得到的二值化的图像，如图 3-14 所示：



a) 处理前的图像

b) 迭代阈值分割

图 3-14 迭代阈值分割结果

Fig.3-14 The segmentation result of iterative thresholding

(3) **最大方差阈值法** 最大方差阈值法动态选择阈值，就是将直方图在某一灰度值处分割成两组，当分成的两组间方差为最大时，此时的灰度值便是阈值。

设一幅图像的灰度值为  $0 \sim m$  级，灰度值  $i$  的像素数为  $n_i$ ，此时我们得到总像素数：

$$N = \sum_{i=0}^m n_i \quad (3-23)$$

各值的概率

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3-24)$$

然后用  $k$  将其分成两组  $C_0 = \{0 \sim k\}$  和  $C_1 = \{k+1 \sim m\}$ ，各组产生的概率如下：

$C_0$  产生的概率

$$w_0 = \sum_{i=0}^k p_i = w(k) \quad (3-25)$$

$C_1$  产生的概率

$$w_1 = \sum_{i=k+1}^m p_i = 1 - w(k) \quad (3-26)$$

$C_0$  的平均值

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^k \frac{ip_i}{w_0} = \frac{\mu(k)}{w(k)} \quad (3-27)$$

$C_1$  的平均值

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^m \frac{ip_i}{w_1} = \frac{\mu - \mu(k)}{1 - w(k)} \quad (3-28)$$

式中  $\mu = \sum_{i=0}^m ip_i$  ——整体图像的灰度平均值；

$\mu(k) = \sum_{i=0}^k ip_i$  ——阈值为  $k$  时灰度平均值。

所以全部采样的灰度平均值为：

$$\mu = w_0\mu_0 + w_1\mu_1 \quad (3-29)$$

两组间的方差用下式求出：

$$\begin{aligned}\sigma^2(k) &= w_0(\mu_0 - \mu)^2 + w_1(\mu_1 - \mu)^2 = w_0 w_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \\ &= \frac{[\mu \times w(k) - \mu(k)]^2}{w(k)[1 - w(k)]}\end{aligned}\quad (3-30)$$

从  $0 \sim m$  之间改变  $k$ ，求上式为最大值时的  $k$ ，即求  $\max \sigma^2(k)$  所对应的  $k^*$  值便是阈值， $\sigma^2(k)$  就是阈值选择函数。利用最大方差阈值法选取的阈值对焊缝图像进行二值分割的结果，如图 3-15 所示：

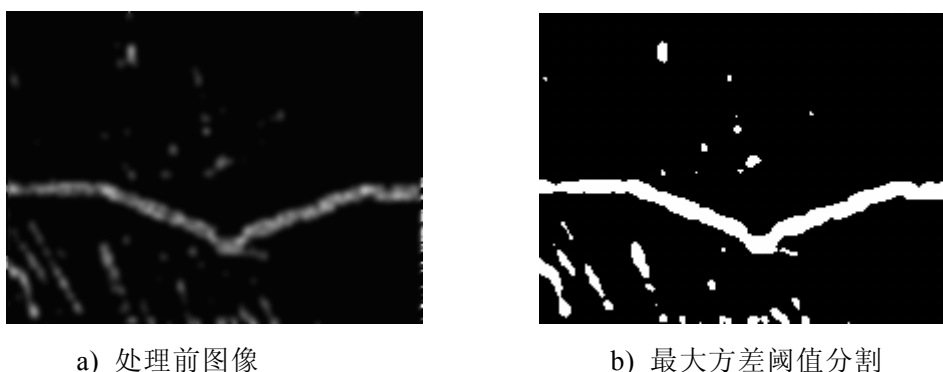


图 3-15 最大方差阈值法分割结果

Fig.3-15 The segmentation result of Maximal square difference thresholding

通过分析比较上述几种自动阈值选择方法可以看出：自动阈值选择方法可以动态的产生阈值，适合于连续的图像处理，处理的结果优于手动阈值选择。采用差分直方图法、迭代阈值分割法和最大方差阈值法处理图 3-15 所示图像得到的阈值分别为 39、42、42，阈值相差不大，二值化的结果也较满意。由于迭代法在计算时比较耗时，而且在保证图像平均照度的情况下才是最优的，不宜用于实时处理；最大方差阈值法处理速度较快，得到的二值图像背景和目标的界限较清晰，故选用该法进行图像分割。

**3.2.3.3 基于先验知识的最大方差阈值法** 上述最大方差阈值法需要从  $0 \sim m$  之间改变  $k$ ，求取最大方差对应的灰度值  $k^*$ ，计算量仍然较大。为了获取最大阈值的取值范围，在实际管道全位置焊接过程中，采用以上标准的最大方差阈值法求取焊缝灰度图像(灰度  $0 \sim 255$ )的分割阈值  $k^*$ ，并统计  $k^*$  出现次数并计算其出现的概率  $P(k^*)$ ，如图 3-16 所示，最大方差阈值  $k^*$  一般出现在  $35 \sim 90$  之间。本系统中，在  $30 \sim 100$  之间改变  $k$ ，求  $\max \sigma^2(k)$  所对应的  $k^*$ 。这样计算量是原来的三分之一，大大缩短图像分割处理时间。

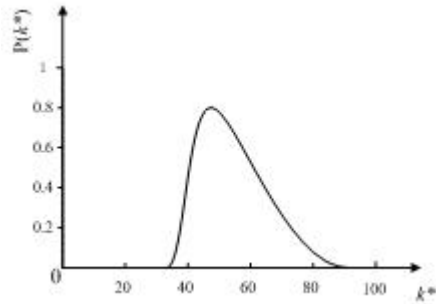


图 3-16  $k^*$ 出现的概率

Fig.3-16 Probability of  $k^*$

**3.2.3.4 图像的反色** 为了后续的形态学图像处理，二值化后的焊缝图像需要进行反色处理。对于图像采集卡是 8bit 的模数转换电路，其变换公式为： $g(x,y) = 255 - f(x,y)$ ，其中  $g(x,y)$  为输出图像。对于二值图像可简化为：

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{当 } f(x,y) = 255 \\ 255, & \text{当 } f(x,y) = 0 \end{cases} \quad (3-31)$$

对图 3-15 b)所示的焊缝二值图像进行反色处理的结果如图 3-17 所示。

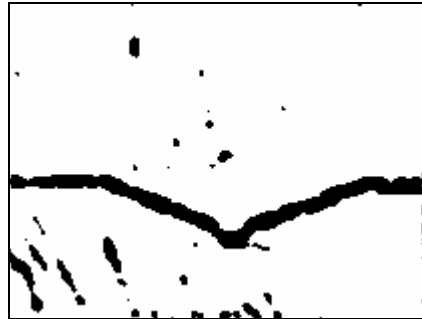


图 3-17 反色后图像

Fig.3-17 The reverse color image

### 3.2.4 焊缝图像的孤点滤波

焊缝图像经阈值分割后得到的二值图像中，结构光激光光带图像表现为一段或两段连续的带状图像，而各种噪声经处理后往往表现为孤立点或小的孤立区域，需要滤掉。滤除这些孤立点和孤立区域可用的方法有多种，每一种算法都有自己的特点，它们处理时间的复杂度也有很大的差别，通过比较

“聚类”和“标记法”，本系统选用“标记法”对焊缝图像进行孤点滤波。

一般情况下，阈值分割后的一帧图像内可能存在多个连通成分。每一个连通成分都对应一个目标像素区域，标记便是给各目标像素区域分配相应的标号<sup>[89]</sup>。对于已经分割出的二值图像，采用 8-连通判别算法作标记。

采用 8-连通判别算法作标记消除二值图像中的孤立点和孤立区域的算法可用图 3-18 所示的流程来解释和实现，设：当前点为  $x_0$ ，其右上点为  $x_1$ ，正上点为  $x_2$ ，左上点为  $x_3$ ，左前点为  $x_4$ ，各标记组用变量  $temp$  表示，该标记组的像素数用数组值  $flag[temp]$  表示。

标记完成后，就要计算每个标记组的像素数(即数组值  $flag[x\_temp]$ )，并确定阈值  $T$ ，如果像素点数小于阈值  $T$ ，则认为该领域内的黑像素点为噪声予以清除；如果像素点数大于  $T$ ，则认为是焊缝的有效信息予以保留。对于本课题研究的 V 形焊缝图像，经过多次试验可确定阈值一般不小于 1000。

图 3-19 给出了采用标记法去除焊缝图像中孤立点的结果，我们可看出采用标记法对二值化后的焊缝图像进行孤点滤波后，能够把离散的孤立点和孤立区域滤除，而且很好的保留了焊缝的特征像素。

### 3.3 焊接特征信息的提取

#### 3.3.1 焊缝图像中心提取

形状分析及识别是模式识别、图像处理与计算机视觉的一个基本问题，而如何表示对象的形状则是其关键所在。目前被广泛采用的方法是骨架法，它是形状描述方法中最简单、最有效的方法之一。除了应用于传统领域，如对象识别与表示、工业零件检测、印制电路板校验、医学图像分析以外，骨架方法已运用到图形学中的变形、计算机辅助几何设计中的等距曲线生成等研究中。所谓骨架(Skeleton)，是指用与原形状连通性和拓扑结构相一致的细曲线作为理想表达的一种对象表示。一块连续二值图的骨架概念首先是由 Blum 提出的，当时他称骨架为“中轴”(Medial axis)，后来称为“对称轴”(Symmetric axis)<sup>[90]</sup>。所以骨架也可以理解为图像的中轴，例如一个长方形的骨架是其较长方向上的中轴线；正方形的骨架是它的中心点；圆的骨架是它的圆心；直线的骨架是它自身，孤立点的骨架也是它自身。此后有不少学

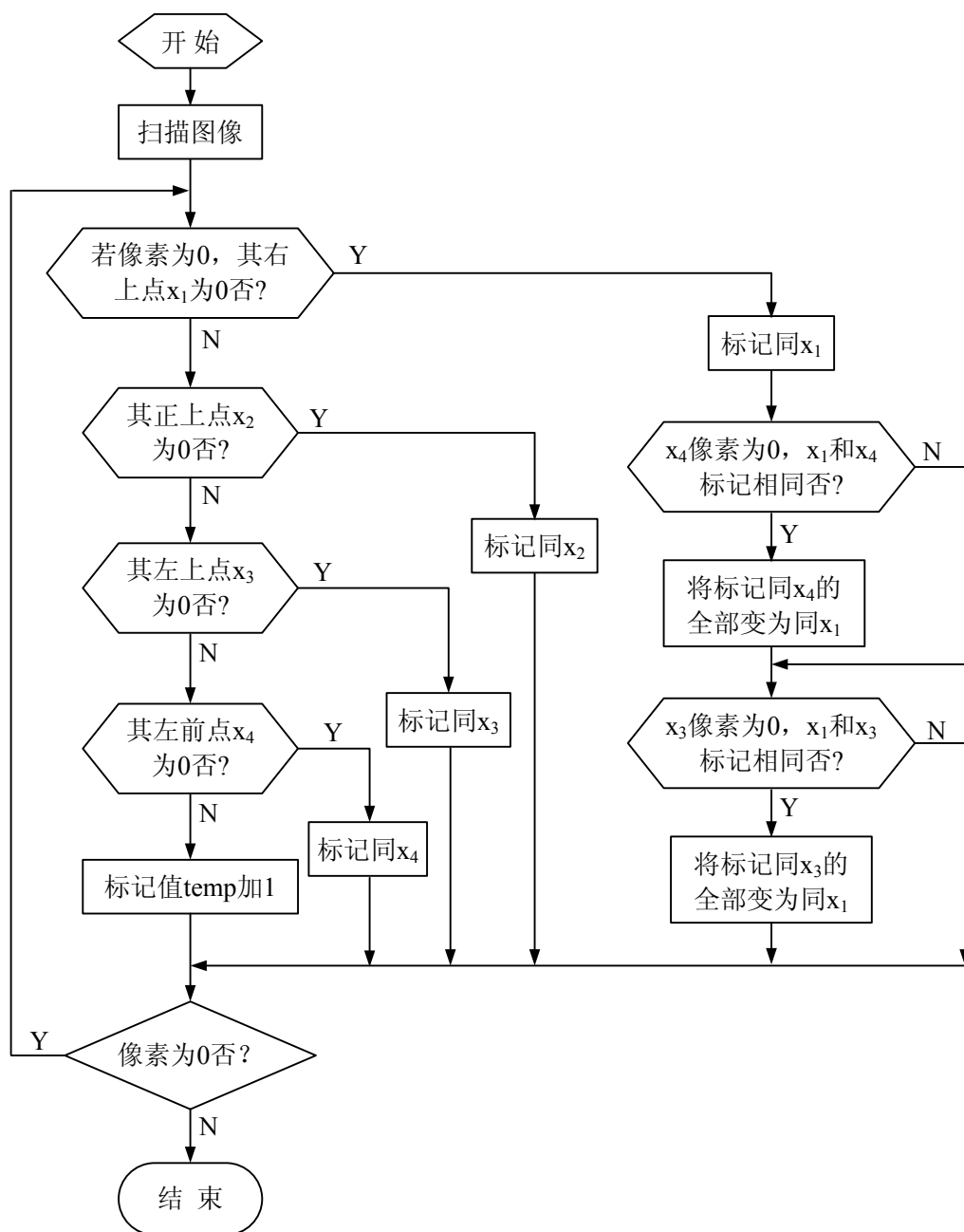


图 3-18 标记算法流程图

Fig.3-18 The flow chart of labeling arithmetic



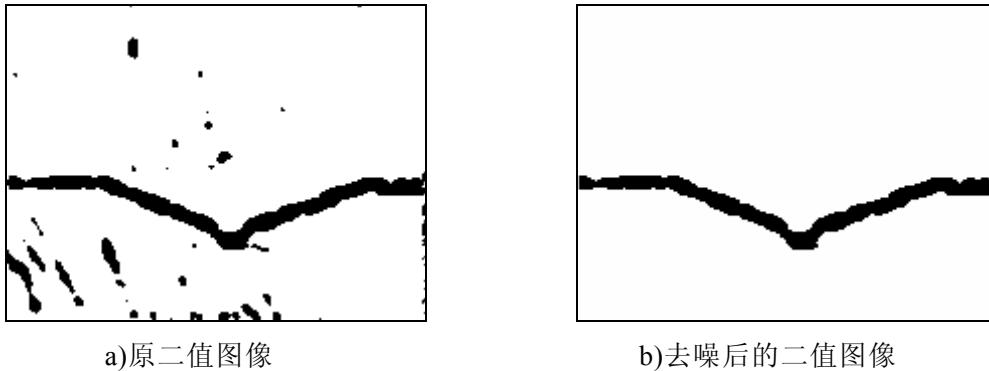


图 3-19 标记法滤波后的图像

Fig.3-19 The image filtered with labeling technique

者对骨架问题作了深入广泛的研究。按处理对象的不同,当前文献中各类骨架算法可分成两类:一类是基于连续几何模型的中轴变换,这类算法直接处理有连续边界模型的形状区域<sup>[91~93]</sup>,如多边形模型、NURBS“多边形”模型(边界曲线为 NURBS 曲线),由于边界曲线连续、光滑,因此这类算法有可能计算出精确的骨架模型,但这类算法的处理对象比较特殊,大多应用于有特别要求的场合,如 CAD;另一类处理对象形状的离散二值图,是当前大部分骨架算法适用的对象,但它们同时不可避免地要克服一个共同的问题,即离散化对骨架生成的影响。

在离散空间下,骨架的基本算法主要有两类:一类是所谓的细化(Thinning)过程<sup>[94,95]</sup>,在满足拓扑不变和几何约束条件下,通过重复剥离边界点直至得到一个连通点集作为“骨架”。其最大优点是能够保证得到的骨架连续,且保持原对象的主要拓扑结构。另一类算法基于距离变换(Distance transform)在高一维空间中生成的距离曲面形成的脊线来建立骨架<sup>[96]</sup>。它们的主要特点是骨架位置准确,外形顺滑,缺点在于容易受边缘噪声的干扰,且难以保证骨架的连续性。此外,从距离变换的概念引申出了基于场变换的算法<sup>[97,98]</sup>,它们对骨架的提取不再局限于只考虑最短距离的边界点,而是其邻近甚至更大范围的一系列边界点集,因而在一定程度上抑制了边界噪声的影响。

对于本文所研究的焊缝图像特点以及其实时性要求,我们选择的骨架提取算法必须满足如下几点:1) 骨架图像必须保持原图像的连通性和拓扑结构;2) 骨架图像尽可能为原图像的中心线;3) 细化的结果应是一个像素宽的线条图像,即非特殊点(交点或端点)在 8 连通意义下只有两个邻接点;4) 应使用尽可能少的迭代次数,即处理速度要快;5) 抗噪声性能好。

利用基于距离变换算法虽然提取的骨架位置更为准确，但不满足实时性要求且会产生断点<sup>[97]</sup>，而细化算法，是在满足拓扑不变和几何约束条件下，通过重复剥离边界点以得到一个连通点集作为“骨架”，得到的骨架图像保持了原图像的连通性和拓扑结构，位置比较准确，且不受边缘噪声的干扰，满足焊缝骨架提取的要求。

判断一个像素点在细化过程中是否可以被删除，应该和该点周围 8 邻域内的其他 8 个点来综合判断，一种典型的判断规则为：

- ◆  $2 \leq NZ(P_1) \leq 6$ ;
- ◆  $Z0(P_1)=1$ ;
- ◆  $P_2 * P_4 * P_8 = 0$  或者  $Z0(P_2) \neq 1$ ;
- ◆  $P_2 * P_4 * P_6 = 0$  或者  $Z0(P_4) \neq 1$ ;

满足以上条件的点即可被删除，其中  $NZ(P_i)$  表示  $P_i$  的 8 邻域内目标像素的个数， $Z0(P_i)$  表示  $P_i$  的 8 邻域内像素值 0 和 1 交替变化的次数。采用细化算法提取 V 形焊缝特征曲线的速度较快，位置准确，得到的 V 形焊缝骨架图像也较平滑如图 3-20 所示，与边缘提取算法相比减少了图像处理的步骤，不需要在提取到焊缝的边缘曲线后，再根据曲线特征来提取 V 焊缝的中心线。

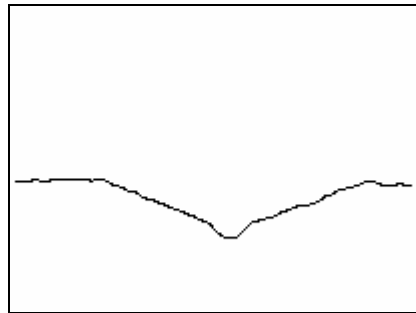


图 3-20 细化后的结果

Fig.3-20 The result of thinning

### 3.3.2 焊缝图像毛刺的去除

当图像被细化成骨架以后，由于噪声影响或在图像转折处，常会使细化后的 V 形焊缝骨架图像产生毛刺，如图 3-21 b) 所示，这样不利于 V 形焊缝特征点的提取，需要对焊缝细化后的特征曲线进行去毛刺处理。

对于含有毛刺的 V 形焊缝骨架图像，用像素周围 8-邻域内黑白相间的

交叉数置换被细化为单个像素宽的 V 形焊缝特征曲线的各个黑像素值，并以此来表示特征点，即交叉数为 1 表示端点，2 表示内点，3 表示分叉点。这样，焊缝特征曲线上的像素值就由特征值来表示，由于端点特征值为 1，分叉点特征值为 3，可以先判断码值，如果存在交叉点，即存在特征值为 3 的点，利用端点置白的方式减少毛刺与直线的长度，而后重新判断它的特征值，直到不存在交叉点。该算法流程图如图 3-22 所示。

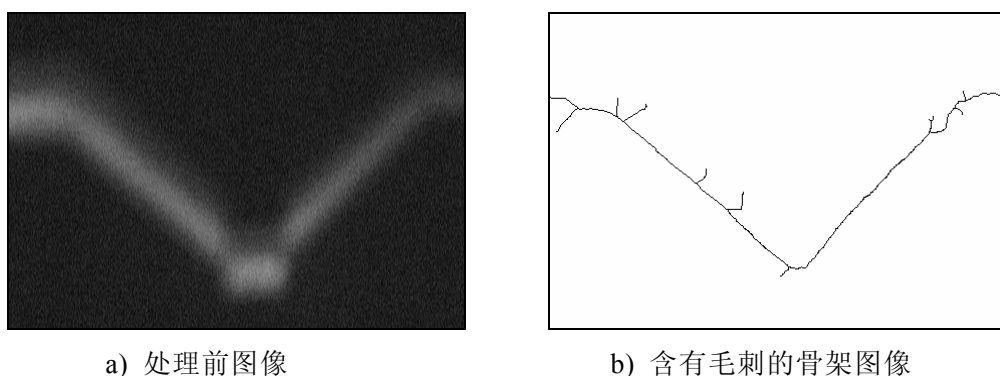


图 3-21 含有毛刺的骨架图像

Fig.3-21 The skeleton image with burr

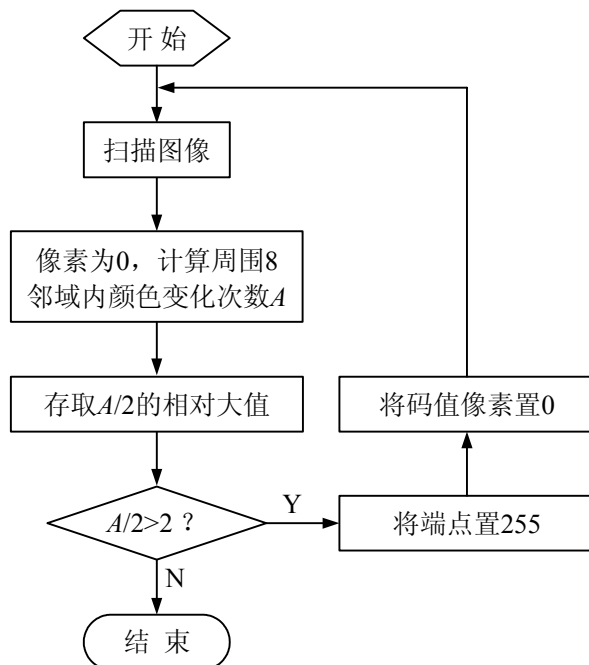


图 3-22 去毛刺算法流程图

Fig.3-22 The flow chart of wiping off burr arithmetic

采用该算法对图 3-21 b)所示的 V 形焊缝骨架图像进行去毛刺处理后的结果如图 3-23 所示。试验结果表明 V 形焊缝骨架曲线上的分叉点得到了很好的消减，为下一步焊缝中心线上特征点的提取奠定了基础。

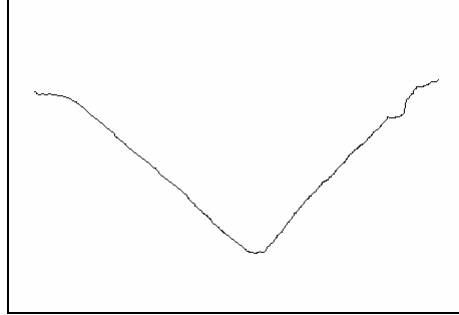


图 3-23 去除毛刺的骨架图像

Fig.3-23 The framework image with burr being wiped off

### 3.3.3 焊缝特征信息提取

通过对视觉系统采集到的焊缝图像进行平滑滤波、图像分割、骨架提取等处理得到所需的焊缝骨架特征后，还要对焊缝进行进一步的特征分析以提取焊缝的中心和两侧边缘点。考虑到大型管线钢管道为 V 形焊缝，并采用结构光视觉检测方式摄取焊缝图像，因此焊缝图像经图像处理得到的是清晰的 V 形曲线，它具有很明显的梯度信息，即焊缝特征曲线上直线段的斜率为约零，而 V 形坡口的左、右两个坡面的斜率均不为零。所以可以采取对焊缝图像进行斜率分析，找到焊缝左边缘和右边缘，并用两斜面交点确定焊缝的中心。

设图像上第  $i$  列的 V 形焊缝中心线的位置像素纵坐标为  $f(i)$ ，则该点的斜率为

$$k(i) = f(i) - f(i-1) \quad (3-32)$$

这里  $f(i-1)$  表示前一列的像素纵坐标<sup>[75]</sup>。为了取得更加平滑的效果，我们取中间相隔  $n$  列的像素求取斜率，这样斜率公式就变成

$$k(i) = \frac{f(i) - f(i-n)}{n} \quad (3-33)$$

通过对多幅焊缝细化后的图像进行分析发现，由于焊接干扰噪声和结构光本身噪声的存在，经过图像处理得到的 V 形焊缝骨架并不是理想的直

线，它存在细小的凸凹点，因此为了提高该焊缝中心检测算法的精度和可靠性，我们采用求取指定点左右各  $n(n=1,2,3,4\cdots)$  列的平均斜率作为该点的斜率，如式(3.34)所示。

$$k(i) = \left[ \frac{f(i+1) - f(i-1)}{2} + \frac{f(i+2) - f(i-2)}{4} + \cdots + \frac{f(i+n) - f(i-n)}{2n} \right] / n \quad (3-34)$$

采用这种基于斜率的焊缝中心检测算法对图 3-23 所示的焊缝骨架图像进行中心位置确定时，当取  $n_{\max} = 3$  时，即采用式(3-35)求取的特征曲线上各段的斜率如表 3-1 所示：

$$k(i) = \left[ \frac{f(i+1) - f(i-1)}{2} + \frac{f(i+2) - f(i-2)}{4} + \frac{f(i+3) - f(i-3)}{6} \right] / 3 \quad (3-35)$$

表 3-1 特征曲线上各点的斜率( $n_{\max}=3$ )

Table 3-1 The slope of each point of characteristic curve( $n_{\max}=3$ )

列数		49	50	51	52	53	54	55	62	63	64	65	66	67
斜率 $k(i)$		1	0.3	0.67	1	1	1	1	1	1	1	1	0.33	1
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
1	1	1	0.33	0.67	1	1	0.67	0.33	0	0	0	0	0	0
112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
0	0	0	-0.33	-0.67	-1	-1	-1	-0.67	-0.33	-1	-1	-1	-1	-1
127	128	129	130	131	132	133	157	158	159	160	161	162	163	164
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.33	-1	-1	-1	-1	-1	-0.33

当  $n_{\max} = 4$  时，即采用式(3-36)求取的特征曲线上各段的斜率如表 3-2 所示：

$$k(i) = \frac{1}{4} \left[ \frac{f(i+1) - f(i-1)}{2} + \frac{f(i+2) - f(i-2)}{4} + \frac{f(i+3) - f(i-3)}{6} + \frac{f(i+4) - f(i-4)}{8} \right] \quad (3-36)$$

表 3-2 特征曲线上各点的斜率( $n_{\max}=4$ )

Table 3-2 The slope of each point of characteristic curve( $n_{\max}=4$ )

列数		99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
斜率 $k(i)$		1	0.25	0.5	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0
112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
0	0	0	-0.25	-0.5	-0.75	-1	-0.75	-0.5	-0.25	-1	-1	-1	-1	-1
127	128	129	130	131	132	133	157	158	159	160	161	162	163	164
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.25	-1	-1	-1	-1	-1	-0.25

当  $n_{\max} = 5$  时，即采用式(3-37)求取的特征曲线上各段的斜率如表 3-3 所示：

$$k(i) = \frac{1}{5} \left[ \frac{f(i+1) - f(i-1)}{2} + \frac{f(i+2) - f(i-2)}{4} + \frac{f(i+3) - f(i-3)}{6} + \frac{f(i+4) - f(i-4)}{8} + \frac{f(i+5) - f(i-5)}{10} \right] \quad (3-37)$$

表 3-3 特征曲线上各点的斜率( $n_{\max}=5$ )

Table 3-3 The slope of each point of characteristic curve( $n_{\max}=5$ )

列数		99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
斜率 $k(i)$		1	0.2	0.4	0.6	0.6	0.4	0.2	0	0	0	0	0	0
112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
0	0	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-1	-1	-1	-1	-1
127	128	129	130	131	132	133	157	158	159	160	161	162	163	164
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.2	-1	-1	-1	-1	-1	-0.2

比较表 3-1、表 3-2 和表 3-3 可以发现：采用式(3-36)和式(3-37)求得的 V 形焊缝特征曲线上各点的斜率值比较平滑、干扰点较少、可靠性高，但是采用式(3-37)求取斜率比较耗时，因此本课题在求取焊缝曲线上各点的斜率

取  $n_{\max} = 4$ 。根据曲线上各点斜率值的变化规律即可分别找到激光带的左右两个拐点  $P_l$  和  $P_r$ ，再根据两线斜率就可求出两线的交点，确定焊缝的中心位置。这种基于斜率的焊缝中心检测方法简单快速实用，经实验证明其精度满足跟踪要求。

### 3.4 本章小结

本章通过对管道焊缝图像处理方法进行全面深入的研究，提出基于先验知识改进的最大方差阈值分割方法，并与一维离散 LoG 滤波、邻域均值滤波和标记法小区域去噪处理组成针对弧焊焊缝图像的预处理组合方法，快速滤除干扰噪声获得清晰的焊缝图像。

对焊缝图像进行数学形态学细化处理得到焊缝骨架，通过斜率分析提取焊缝特征信息。处理一幅像素  $400 \times 300$  图像的时间不大于 0.08 秒，实验表明采用本章给出的焊缝图像处理方法提取焊缝特征，精度和速度满足管道焊接焊缝跟踪的要求。

## 第4章 管道焊接机器人的焊缝跟踪控制

### 4.1 引言

将机器人技术引入焊接生产是为了发挥机器人的运动控制优势，引导焊枪沿焊缝轨迹以要求的焊接速度实现焊缝跟踪运动，完成高质量的自动化焊接任务。本研究将移动机械臂技术引入长输管道现场施工中环形焊缝焊接，以实现无导轨智能化焊接，减轻焊接生产的劳动强度，提高生产率。针对管道环形运动的特点，提出永磁轮吸附于管道表面的滑动转向移动机器人与二维直角坐标机器人组成焊枪侧置的管道焊接机器人结构。

为了适应自动化焊接工艺要求，减小焊接偏差，提高焊接质量，本章针对该管道焊接机器人研究其焊缝自动跟踪方法，建立管道焊接机器人移动平台的运动学模型，通过分析其管道焊接机器人的具体应用，采用 Lyapunov 稳定性理论设计移动平台环形运动控制率；研究基于圆柱坐标的管道焊接机器人环形焊接焊缝跟踪算法，以及当管道焊接机器人车轮轴线与管道轴线存在偏角时的跟踪补偿，达到有效提高跟踪精度的目的。

### 4.2 管道焊接机器人的结构

长输管道的焊接需要现场施工，而且所用管道直径通常在  $\Phi 600 \sim 1500 \text{mm}$  之间<sup>[99]</sup>。传统的关节式焊接机器人虽然运动控制灵活，但运动空间有限；将关节式焊接机器人安装在三自由度的龙门架上可扩大其工作范围，但仅适合工厂车间内使用。采用轨道自动焊机需要安装与焊缝平行的轨道，只适合焊缝平直的情况，而且当工件发生变形，需人工调整。移动机械臂不仅具有机器臂的操作灵活性，而且具有移动机器人工作空间的广阔性，使移动机械臂拥有几乎无限大的工作空间和高度的运动学冗余。

在管道表面轮式机器人本体具有 3 个自由度，其运动轨迹由驱动轮的运动决定。而驱动轮与管道外表圆柱面之间存在着运动不确定的因素，比如车轮在管道表面的打滑等等，因此仅通过控制驱动轮无法实现对焊枪运动轨迹的实时、精确控制；而且，如果采用两侧车轮差动控制车体运动方向，在车体与管道轴线角度较大时会出现只有 3 个车轮接触管道表面，造成焊枪轨迹



失控。

轮式移动机器人空间位置条件约束属于非完整运动约束，在车轮轴线方向上运动受限，致使焊枪在该自由度方向上的调节范围有限。如果将焊枪与轮式机器人本体固联，就不能保证焊枪准确沿焊缝焊接。为此本文在焊枪与轮式机器人本体之间增加一横向调节机构，使得焊枪在沿垂直于机器人前进方向上增加一自由度，跟踪焊缝在管道轴线方向的偏差。利用车轮进行垂直于管道轴线的环形运动，其两侧差速只是保证车体垂直于管道轴线。垂直调整机构用于跟踪焊缝在直径方向的偏差。车体上与焊枪相应位置安装角度传感器，以检测焊枪所处的方位角。这样，车轮垂直于管道轴线运动和横向、垂直调节机构的运动组成圆柱坐标系的三个轴，跟踪以圆柱坐标表示的焊缝轨迹尤为简便，简化了机器人多刚体运动学的复杂解耦问题。

因为其机械结构的自适应特性，滑动转向移动机器人被认为是全地形车辆。其自适应特性是由于它没有专门转向系统，四个全部为主动轮，而且同一侧的两个车轮具有相同的转速，通过控制机器人两侧的轮对差速驱动可使机器人前进、后退、转向以及原地转动。因此滑动转向移动机器人具有结构简单、运动灵活等特点，在复杂情况下适应性强<sup>[100]</sup>，适合作为管道焊接机器人的移动平台。

使用全位置管道焊机对管道进行全位置焊接时，为保证焊接质量和均匀成形，须对不同位置的焊接规范参数进行控制。机器人车体两侧分别安装一只 360°绝对式倾角传感器，实时感知管道焊接机器人及焊枪所处空间角度位置，为管道焊接机器人姿态调整、焊接规范参数的自动调整和焊接机器人焊接每道焊道起弧、收弧位置的控制提供了必要条件。

因此本研究中管道焊接机器人采用将焊枪置于移动车体一侧，并可调整横向偏移量和焊枪高度的结构。这样焊接机器人吸附在一侧管道上运动，避免管道对口错边对跟踪精度的影响。为了适应管道下向焊工艺要求，布置两个视觉传感器对称置于焊枪两侧，分别用于两侧半圆周焊接跟踪，避免焊接机器人的频繁调头操作。

## 4.3 管道焊接机器人的运动学模型

### 4.3.1 滑动转向移动机器人的模型

4.3.1.1 自由车体运动学建模 为了建立滑动转向移动机器人的运动学模

型，假设其在惯性坐标系  $O_g X_g Y_g$  的水平面内运动，并且其本身的坐标系为  $O_l X_l Y_l$ ，其原点  $O_l$  固联在滑动转向移动平台的质心 COM，如图 4-1 所示。车体的位置与姿态由车体质心的位置与姿态表示，其广义坐标  $q(t) \in \mathfrak{R}^3$  定义为

$$q(t) = [x(t) \ y(t) \ \theta(t)]^T \quad (4-1)$$

式中  $x(t), y(t) \in \mathfrak{R}$  ——质心沿  $X_g, Y_g$  坐标轴向位置；

$\theta(t)$  ——坐标系  $O_l X_l Y_l$  相对坐标系  $O_g X_g Y_g$  逆时针旋转角度。

车体线速度

$$v_c(t) = [v_{cx}(t), v_{cy}(t)]^T \quad (4-2)$$

式中  $v_{cx}(t), v_{cy}(t) \in \mathfrak{R}$  ——质心沿  $X_l, Y_l$  轴运动速度。

车体角速度

$$\omega_c(t) = \dot{\theta}(t) \quad (4-3)$$

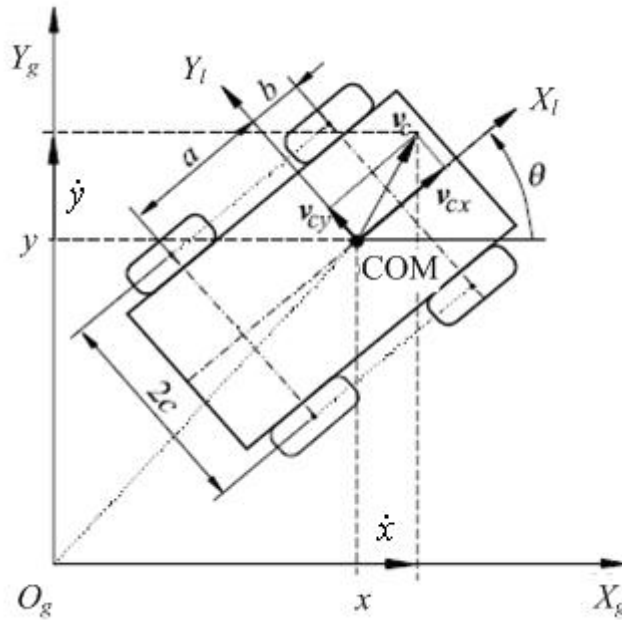


图 4-1 自由车体的坐标系系统

Fig.4-1 Reference frame of free mobile

由图 4-1 所得以下关系

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

4.3.1.2 车轮与移动平台的运动学关系 车轮与滑动转向移动平台的运动学关系如图 4-2 所示。为简化起见，忽略车轮厚度并假定车轮与平面为点接触。移动平台运动瞬心在坐标系  $O_l X_l Y_l$  中表示为  $(x_{ICR}, y_{ICR})$ 。

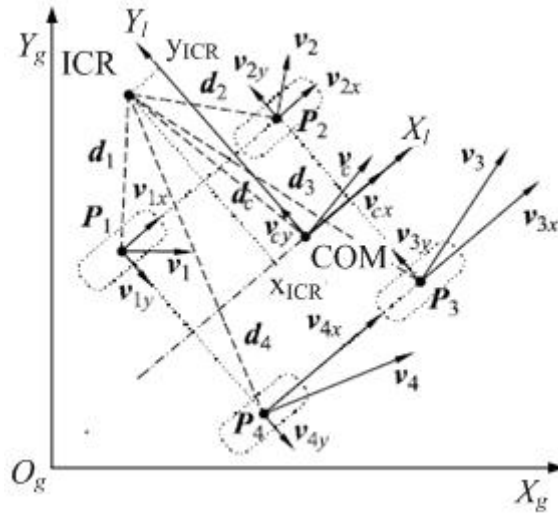


图 4-2 车轮与滑动转向移动平台的运动学关系

Fig.4-2 Relationships of wheels and vehicle velocity

由图 4-2 得

$$\frac{v_{cx}}{y_{ICR}} = \frac{-v_{cy}}{x_{ICR}} = \omega_c \quad (4-5)$$

而且

$$\begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & \frac{c}{x_{ICR}} \\ 1 & -\frac{c}{x_{ICR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

式中  $\omega_L$ ——左侧轮对角速度；  
 $\omega_R$ ——右侧轮对角速度；

$2c$ ——两侧轮之间的距离。

对式(4-6)进行简单的代数变换,即可得到车轮转速与车体质心在坐标系  $O_L X_L Y_L$  中速度之间的关系

$$\begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & \frac{rx_{ICR}}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \\ \frac{\omega_L - \omega_R}{2} \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{x_{ICR}}{c} & -\frac{x_{ICR}}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

另外可知

$$\begin{bmatrix} v_{1y} \\ v_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{4y} \\ v_{3y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{a}{x_{ICR}} \\ 0 & -\frac{b}{x_{ICR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

式中  $a$ ——车体质心至后轮轴的距离,见图 4-1;

$b$ ——车体质心至前轮轴的距离。

由式(4-8)知,如果不知  $x_{ICR}(t)$ ,则不可能控制车轮横向速度(横向滑动速度)。

4.3.1.3 滑动转向移动平台运动学 由式(4-5)可得滑动转向移动平台运动约束为

$$v_{cy} + x_{ICR} \dot{\theta} = 0 \quad (4-9)$$

由式(4-4)与(4-9)可得

$$\begin{bmatrix} -\sin \theta, \cos \theta, x_{ICR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = A(q, t) \dot{q}(t) = 0 \quad (4-10)$$

因为广义速度  $\dot{q}(t)$  总是在  $A(q, t)$  的零空间,可写为下列运动学关系式

$$\dot{q}(t) = S(q, t) \mathbf{v}_c \quad (4-11)$$

其中

$$S^T(q, t) \cdot A^T(q, t) = 0 \quad (4-12)$$

而且

$$S(q, t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & -\frac{1}{x_{ICR}} \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

若取  $\mathbf{v}_c = [v_{cx}(t), \omega(t)]^T$ ，则由式(4-11)、(4-12)可得

$$S(q, t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & x_{ICR} \sin \theta \\ \sin \theta & -x_{ICR} \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

**4.3.1.4 滑动转向移动平台操作限制** 对于直线运动，车体运动瞬心在坐标系  $O_l X_l Y_l$  内的坐标为  $(0, \infty)$ ，这时式(4-10)就变为

$$v_{cy}(t) = 0 \quad (4-15)$$

此时车体无横向滑移。

对于车体做曲线运动的情况，运动瞬心在  $X_l$  轴方向投影不为零，则由式(4-10)知  $v_{cy}(t) \neq 0$ ，即车体发生横向滑移。一定量的横移是使车辆走过曲线路径所必需的。但是转向半径受多种因素的影响，不仅与两侧车轮转速比、轮距、轴距车体质心高度、车体质量以及车轮与地面的摩擦系数有关，精确求解困难。K. R. Weiss 曾通过列线图的方法求解理论转向半径，但该方法须经多次试凑，并且不能保证解的唯一性及存在性<sup>[101]</sup>。

另外，过大的横向滑移会使车辆失去运动稳定性<sup>[102]</sup>。L. Caracciolo 等人指出为当  $x_{ICR}(t)$  超出轮座范围，例如  $|x_{ICR}(t)| > a$  时，横向滑移量过大， $v_{cy}(t)$  就会失去控制<sup>[103]</sup>。

为了改进控制以限制滑移量的大小，引入一个所谓的人为非完整约束  $x_{ICR}(t) = x_0$ ，这样，下列约束就人为地强加给车辆的运动：

$$v_{cy}(t) + x_0 \dot{\theta} = 0 \quad (4-16)$$

式中  $x_0$ ——给定的横向滑移限制增益，是一个正常数， $x_0 \in \mathfrak{R}$ 。

例如  $x_0$  可在  $0 < x_0 < a$  范围内选择以保证  $|x_{ICR}(t)| < a$ 。通过引入这个人为约束，式(4-14)即可写为<sup>[104]</sup>

$$S(q, t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & x_0 \sin \theta \\ \sin \theta & -x_0 \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

### 4.3.2 环形运动控制

对于本研究中管道焊接机器人移动平台以差速方式驱动控制，并不完全依赖其进行轨迹跟踪，其主要任务是实现垂直于管道轴线的环形运动，保证可靠吸附，并对焊接速度进行控制。当进行直线运动时，其瞬心可接近无穷远处，其在  $X_l$  方向投影约为 0，即横向滑移可以忽略。

虽然采用动力学方程和非完整约束，推导基于转矩控制的跟踪模型，以控制移动机器人的运动，但是车轮转矩的控制并不是很方便。由于管道焊接机器人焊接速度一般较小，而且移动平台的质量远大于二维焊枪调整机构，可以忽略其动态影响。而控制车轮速度是较好的选择<sup>[105]</sup>。

因此采用基于误差的运动学模型，设计基于 Lyapunov 的控制器。当  $x_0 = 0$  时，由式(4-17)知，其运动模型可写为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

则其运动的期望值为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

式中  $v_r$  ——移动机器人沿  $X_l$  轴的期望线速度；

$\omega_r$  ——移动机器人期望的转向角速度。

偏差  $e_x, e_y$  与  $e_\theta$  表示如下

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

利用速度约束，以及本研究中要求  $\theta_r=0$ ，可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} e_y \\ -e_x \\ -1 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta \\ v_r \sin e_\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

控制的目标是设计控制率，使偏差为 0，提出  $v_f$ ， $\omega_f$  的控制律

$$\begin{cases} v_f = v_r \cos e_\theta + K_x e_x \\ \omega_f = v_r (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta) \end{cases} \quad (4-22)$$

式中  $K_x$ ——偏差  $e_x$  的控制增益系数；

$K_y$ ——偏差  $e_y$  的控制增益系数；

$K_\theta$ ——偏差  $e_\theta$  的控制增益系数。

代入式(4-21)有

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_y (v_r (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta)) - K_x e_x \\ -e_x (v_r (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta)) + v_r \sin e_\theta \\ -v_r (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta) \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

选择如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} (e_x^2 + e_y^2) + \frac{1 - \cos e_\theta}{K_y} \quad (4-24)$$

显然式(4-24)确定的 Lyapunov 函数  $V$  是正定的。求其对时间的一次导数，并结合式(4-20)、式(4-23)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y - \frac{1}{K_y} \sin e_\theta \\ &= -k_x e_x^2 - \frac{K_\theta \sin^2 e_\theta}{K_y} \end{aligned} \quad (4-25)$$

$$\leq 0$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知，选择系数  $K_x$ ， $K_y$ ， $K_\theta$  均为正常数，应用式(4-22)控制率可保证管道焊接机器人跟踪系统环形运动的稳定性。

## 4.4 管道焊接机器人的焊缝跟踪

前一节给出了管道焊接机器人的运动学模型。利用其跟踪平面内曲线焊缝时由于需要调整前进方向，转动瞬心位置不固定，转向半径难以精确计算，存在一定难度。

对于管道焊接机器人，焊接对象是管道的对接环形焊缝。理论上焊缝垂直于管道轴线，一般处于同一平面内。因为管口直径、圆度偏差、坡口加工精度以及焊接变形引起焊缝存在偏差，所以偏差范围较小。可以利用滑动转向移动机器人结构简单，驱动能力强，做直线运动时控制简单等特点，将其用于管道环形焊缝的自动化焊接时提供环形运动的驱动。

理想情况下，管道是一个等直径圆柱面，管道焊接机器人移动平台在管道上做两侧轮速相等的环形运动，其车轮轴线与管道轴线平行。然而，实际焊接过程中，必然存在管道直径、圆柱度误差，以及两侧轮速的偏差，导致管道焊接机器人车轮轴线与管道轴线之间产生一个小偏角。当该偏角增到一定程度，会导致某个车轮与管道脱离接触，只有三个车轮与管道接触，使焊缝跟踪失控。

因此，管道焊接机器人进行环形焊缝跟踪过程中要进行的控制有如下两方面：(1)移动平台运动控制，保证其车轮轴线基本平行于管道轴线；(2)控制调整机构补偿焊缝的偏差。

本节首先给出管道焊接机器人移动车体的车轮轴线平行于管道轴线时，即理想状态下的跟踪方法；然后研究实际过程中，车轮轴线与管道轴线存在偏角时的跟踪补偿。

### 4.4.1 理想状态下管道跟踪算法

建立如图 4-3 所示的坐标系系统。 $O_w X_w Y_w Z_w$  为管道坐标系，与被焊接管道固联； $O_c X_c Y_c Z_c$  为焊接机器人坐标系，与焊接行走单元固联； $O_l X_l Y_l Z_l$  为焊枪坐标系，原点为焊枪中心与管道表面的交点； $O_s X_s Y_s Z_s$  为传感器光平面坐标系，原点为光平面中心线与摄像机光轴交点。 $d_1$  为车轮中心至  $O_c$  的高度， $d_3$  和  $d_a$  为横向机构初始偏移量和关节变量， $d_5$  和  $d_v$  为垂直机构初始偏移量和关节变量， $R$  为管道外径。由多刚体坐标变换可求出传感器坐标系及焊枪坐标系至管道坐标系的变换矩阵  ${}^L_w T$ ， ${}^T_w T$ 。



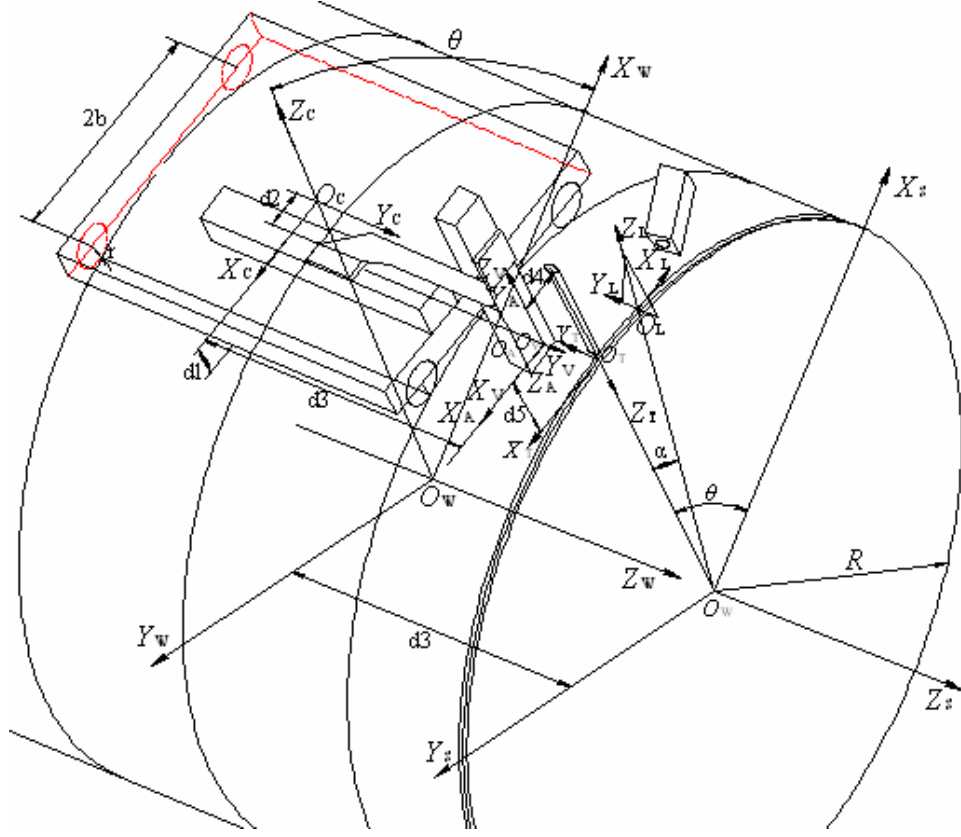


图 4-3 管道焊接机器人坐标系系统

Fig.4-3 Reference frame pipeline welding robot

传感器坐标系至管道坐标系的变换矩阵  ${}^L_w T$  为

$${}^L_w T = \begin{bmatrix} \sin(\theta - \alpha) & 0 & \cos(\theta - \alpha) & (L_1 + d_v) \cos \theta \\ -\cos(\theta - \alpha) & 0 & \sin(\theta - \alpha) & (L_1 + d_v) \sin \theta \\ 0 & -1 & 0 & d_3 + d_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

式中  $L_1 = -d_5 + R(1 - \cos \alpha) + H$  ;

$$H = \sqrt{(R + r)^2 - b^2} + d_1。$$

令  $\phi = \theta - \alpha$  , 则

$${}^L_w T = \begin{bmatrix} \sin \phi & 0 & \cos \phi & (L_1 + d_v) \cos(\phi + \alpha) \\ -\cos \phi & 0 & \sin \phi & (L_1 + d_v) \sin(\phi + \alpha) \\ 0 & -1 & 0 & d_3 + d_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

传感器检测到焊缝为  $[0 \ y_l \ z_l]^T$ ，则焊缝在管道坐标系内轨迹为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = {}^L_w T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_l \cos \phi + (L_1 + d_v) \cos(\phi + \alpha) \\ z_l \sin \phi + (L_1 + d_v) \sin(\phi + \alpha) \\ -y_l + d_3 + d_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

焊枪坐标系至管道坐标系的变换矩阵  ${}^T_w T$  为

$${}^T_w T = \begin{bmatrix} -\sin \theta & 0 & -\cos \theta & (H - d_5 + d_v) \cos \theta \\ \cos \theta & 0 & -\sin \theta & (H - d_5 + d_v) \sin \theta \\ 0 & -1 & 0 & d_3 + d_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

焊枪焊丝端部  $[0 \ 0 \ z_t]^T$  在管道坐标系下的轨迹为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^T_w T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_t \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_t \cos \theta + (H - d_5 + d_v) \cos \theta \\ -z_t \sin \theta + (H - d_5 + d_v) \sin \theta \\ d_3 + d_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

轨迹跟踪控制时，采用固定的控制周期，焊枪当前位置为  $P(k)$ ，角度为  $\theta(k)$ ，焊枪调整量一般比较小，焊接速度由焊接机器人环形运动保证，为了保证管道全位置焊接工艺要求的所在空间位置时的焊接速度，下一个位置采样点角度为  $\theta(k+1)$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \frac{v(k)}{R} T \quad (4-31)$$

式中  $v(k)$ ——当前位置要求的焊接速度；

$R$ ——管道半径;

$T$ ——控制周期。

在  $\theta(k+1)$  位置根据视觉传感器检测焊缝轨迹确定焊枪位置, 也就是焊枪的期望值  $P(k+1)$ , 则本周期内焊枪位置调整量为

$$[\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T = P(k+1) - P(k) \quad (4-32)$$

由于焊接机器人的调整由移动平台的车轮转速、水平和垂直调整机构完成。所以调整量为  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  形式, 需根据逆运动学反求各运动部件控制量, 计算较复杂。

根据管道焊接与本研究焊接机器人的特点, 可采用圆柱坐标表示焊缝轨迹。这样焊接移动平台进行环形运动, 保证焊接速度; 水平调整机构完成坐标轴  $z$  向调整; 垂直调整机构完成  $r$  轴方向的调整。 $\omega_L(k)$ 、 $\omega_R(k)$  分别为左侧、右侧车轮转速。则各轴位置控制量如下:

$$\begin{cases} d_a = \Delta y_l = y_l(k+1) - y_l(k) \\ d_v = \Delta z_l = z_l(k+1) - z_l(k) \\ \omega(k) = \frac{v(k)}{R} \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \frac{v(k)}{R} T \end{cases} \quad (4-33)$$

各速度控制量为

$$\begin{cases} \dot{d}_a = \frac{\Delta y_l}{T} = \frac{y_l(k+1) - y_l(k)}{T} \\ \dot{d}_v = \frac{\Delta z_l}{T} = \frac{z_l(k+1) - z_l(k)}{T} \\ \omega_R(k) = \omega_L(k) = \omega(k) = \frac{v(k)}{R} \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \frac{v(k)}{R} T \end{cases} \quad (4-34)$$

这样管道焊接机器人各运动控制量分别与视觉传感器采集获得的焊缝位置坐标以及焊枪的角度联系, 物理意义明确, 计算简便。

#### 4.4.2 实际焊接中的控制补偿

当管道直径、圆柱度误差, 或两侧轮速的偏差导致管道焊接机器人车轮

轴线与管道轴线之间产生一个小偏角时，焊枪偏离理想位置，需要对各控制量进行补偿，以保证焊缝跟踪精度。

为了检测车轮轴线与管道轴线之间的偏角，在移动平台左右两侧中轴线分别安装一个倾角传感器，其输出分别为  $\theta_L$ 、 $\theta_R$ 。如图 4-4 所示， $\theta_L \neq \theta_R$  产生偏角时，各控制量的补偿为

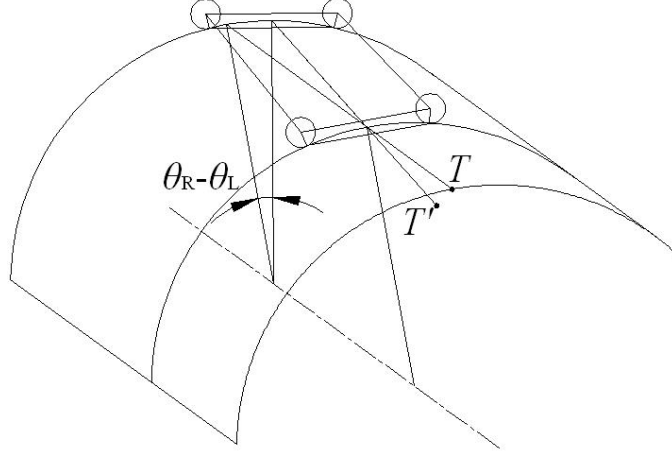


图 4-4 管道焊接机器人偏角的影响

Fig.4-4 Effect of drift angle

$$\begin{cases} \delta_z = -L_2(1 - \cos(\theta_R - \theta_L)) \\ \delta_r = \frac{L_2 R}{a}(1 - \cos(\theta_R - \theta_L)) \\ \delta_\theta = \frac{A}{R} \sin(\theta_R - \theta_L) \end{cases} \quad (4-35)$$

## 4.5 本章小结

本章建立了管道焊接机器人移动平台的运动学模型，通过分析其在管道环形对接焊缝焊接中的具体应用，采用 Lyapunov 稳定性理论设计了移动平台环形运动控制率；提出了基于圆柱坐标的管道焊接机器人环形焊接焊缝跟踪算法，并给出当管道焊接机器人车轮轴线与管道轴线存在偏角时的跟踪补偿量，使跟踪精度有效地提高。

## 第5章 管道焊接机器人及跟踪实验

### 5.1 引言

本章具体设计焊枪侧置结构形式的管道焊接机器人的本体、视觉传感器以及控制系统软件、硬件结构，构建管道焊接机器人跟踪系统。应用管道焊接机器人进行管道对接环形焊缝的跟踪试验，以验证视觉传感器、图像处理软件、跟踪控制算法以及整个跟踪系统在实际焊接条件下的性能。

### 5.2 管道焊接机器人系统

#### 5.2.1 管道焊接机器人本体

本文所设计的管道焊接机器人能够在管道表面爬行，实现管道的自动化焊接。机器人能够自动沿焊缝行走，不需要在坡口一侧画上跟踪平行线，从而实现真正焊缝的自动跟踪。管道焊接机器人主要由机器人行走单元、焊枪横纵调整单元、焊接摆动机构、视觉跟踪以及焊枪组成。整体结构如图 5-1 所示。

管道焊接机器人用于长输管道的现场焊接，结构设计必须满足重量轻、运动灵活和控制方便等要求。

**5.2.1.1 行走单元设计** 管道焊接机器人的行走机构不仅承载其整体，同时还要不断调整行走方向，以便实现焊缝跟踪。在此选用四轮行走方式，依靠管道焊接机器人两侧电机的差速实现其转向而达到沿焊缝行走的目的。为了增大吸附能力和驱动能力，四轮均为磁性轮且为主动轮。每侧的两只磁性轮是由同一个交流伺服电机经过减速器直接驱动，这样可以做到传动比精确，易于实现控制，其结构如图 5-2 所示。

该管道焊接机器人本体采用了四轮驱动，这样在工作中若遇到特殊情况出现打滑几率会大大减小，同时提高了驱动力。在相同的工况下可以携带更多的装备和克服更大的阻力。本体上的各部分位置布置充分考虑了中心的位置稳定性，使在整个焊接过程中管道焊接机器人的重心在本体的几何中心位置附近。

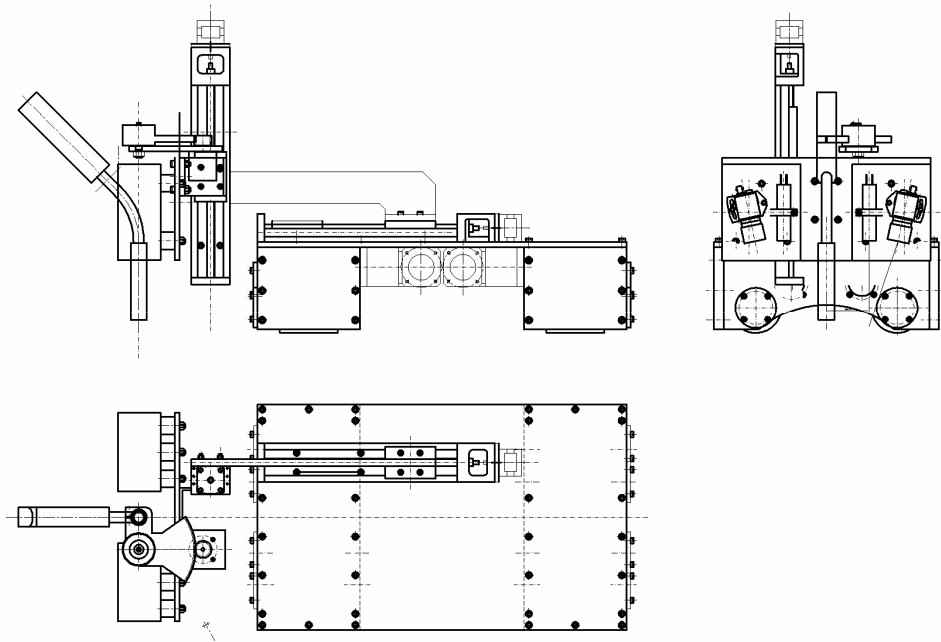
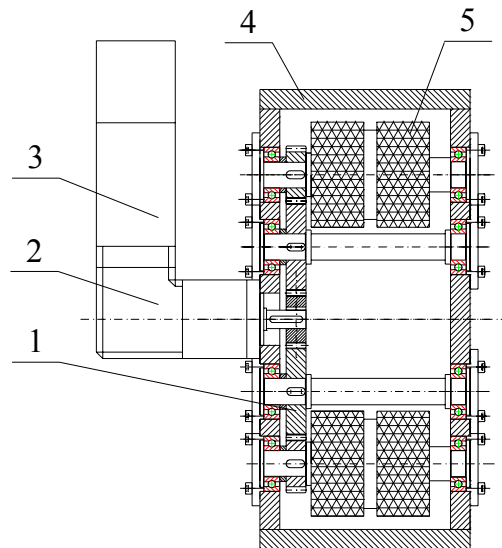


图 5-1 管道焊接机器人结构

Fig.5-1 The structure of pipeline girth-welding robot



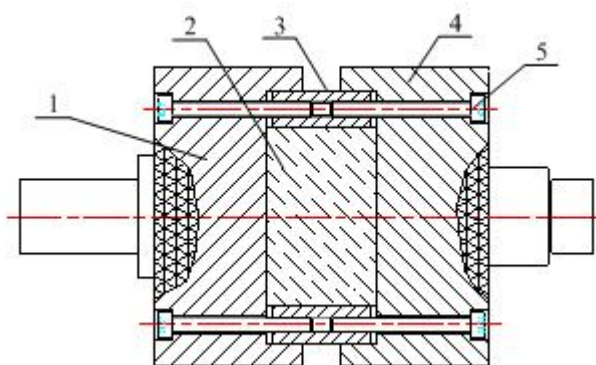
1.传动齿轮组 2.减速器齿轮 3.交流伺服电机 4.车架 5.磁轮

图 5-2 行走机构结构

Fig.5-2 The structure of stepped machine

**5.2.1.2 磁性轮设计** 管道焊接机器人的最关键部分是本体的机械结构，它直接关系到整个管道焊接机器人能否可靠地吸附在管道的表面，并在管道上灵活运行。在本体的设计中，磁性轮的设计尤为重要。下面对磁性轮的设计进行说明。

**(1) 磁性轮的结构设计** 管道焊接机器人在钢制管道上要实现无轨道焊接，必须让机器人依附在管道上。由于长输管道材质为管线钢，是铁磁性材料，可以利用磁力使管道焊接机器人吸附在管道表面上。产生磁源的方式有两种：永磁材料生磁和电磁铁生磁。电磁铁生磁，磁力的大小可以控制，比较灵活，但是要消耗电能，同时安全性较差，当发生意外断电时，管道焊接机器人容易从管道上掉下来，造成事故，且电磁铁本身也存在电阻与温升的问题，所以选用永磁式磁铁可以避免上述的缺点<sup>[106]</sup>。管道焊接机器人在管道表面上行走的方式主要有三种<sup>[107]</sup>：履带式、脚式和轮式。从吸附力大小的角度看，履带式行走方式较好，虽然具备了轮式和脚式的特点，但其结构复杂，机械结构和加工制造不方便。脚式虽然设计方便，但是对于行走在管道表面上是不适合的，一般很少采用。因此，选用了磁性轮式结构。尽管磁性轮与管道的表面是线接触，接触面积较少，但通过利用新型的磁性介质，适当增加磁性轮的宽度，以便增加磁性轮与管道表面的接触面积，加大吸附力，但是要兼顾管道焊接机器人在焊接过程中的灵活性。通过合理的设计，实验证明轮式产生的磁力完全能够满足管道焊接机器人所需要的磁力，而且磁性轮的结构简单、行走稳定、易于控制。设计的磁轮左右半轮把磁铁的轴向磁力引导出来，通过管道构成闭合的磁路，产生强大的磁力使管道焊接机器人可靠地吸附在管道上。磁轮具体结构如图 5-3 所示。



1.左半轮 2.磁性介质 3.隔磁铜环 4.右半轮 5.螺钉

图 5-3 磁性轮结构

Fig.5-3 The structure of magnetism wheel

(2) 磁性轮所需磁力计算 为了保证焊接过程中管道焊接机器人在环形管道的任意位置都能稳定的焊接，所以磁性轮的磁力大小的设计关系到管道焊接机器人稳定、灵活性。磁力太大，会引起管道焊接机器人行走困难，需要的驱动力矩加大，这样增加了管道焊接机器人的重量，惯性增大，不易控制；如果管道焊接机器人的磁力太小，吸附管道不牢靠，容易在焊接过程中引起打滑，影响焊接的质量。为了确定合适的磁力，以便在保证行走稳定的前提下，尽量减少磁力，需要对管道焊接机器人在管道全位置焊接过程中所需吸附磁力进行分析。

由于管道焊接机器人前后轮距与管道直径相比比较小，可将其在管道上的运动简化成在斜面上运动，简化后管道焊接机器人的受力模型如图 5-4 所示。

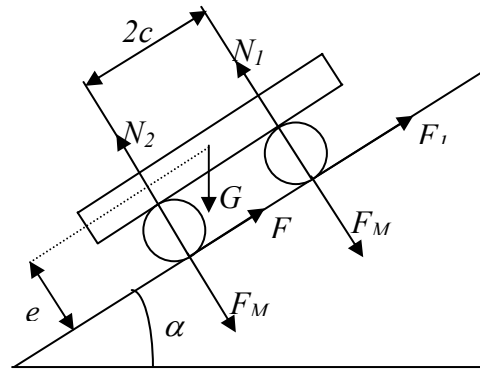


图 5-4 管道焊接机器人简化结构

Fig.5-4 The simple structure of pipeline circum-welding robot

在焊接过程中，焊接速度一般在  $0.1 \sim 0.7 \text{m/min}$ ，运动速度较慢，可以忽略管道焊接机器人的惯性对整体受力的影响。这时，为了保证管道焊接机器人能稳定地吸附在管道上，必须满足两个平衡，即受力平衡和所受力矩平衡，也就满足不打滑和不翻转的条件。磁力产生的摩擦力与管道焊接机器人所受的重力平衡。实现圆周及全位置焊接，必须克服重力，应该使磁性轮对工件表面具有足够的正压力，当管道焊接机器人置于斜面上运动时，不打滑的条件是

$$f(N_1 + N_2) \geq G \sin \alpha \quad (5-1)$$

$$N_1 + N_2 = G \cos \alpha + 2F_m \quad (5-2)$$

式中  $f$  ——摩擦系数；

$G$  ——小车重量；

$N_1$  ——斜面对管道焊接机器人本体前方两个磁轮的支反力；



$N_2$ ——斜面对管道焊接机器人本体后方两个磁轮的支反力；

$F_m$ ——两个前磁性轮或者后磁性轮产生的磁力。

根据式(5-1)和(5-2)得出：

$$F_m \geq \frac{G}{2} \left( \frac{1}{f} \sin \alpha - \cos \alpha \right) = \frac{G \sqrt{1+f^2}}{2f} \sin(\alpha - \beta) \quad (5-3)$$

式中  $\sin \beta = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}};$

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1+f^2}}。$$

所需  $F_m$  最小值为：

$$F_m = \frac{G}{2} \frac{\sqrt{1+f^2}}{f} \quad (5-4)$$

因为磁性轮的磁性物质在磁性轮的中心，通过导磁性较好的低碳钢与管道接触，它与管道间的摩擦系数  $f$  的取值范围在 0.08~0.16 之间。管道焊接机器人的重量为 40kg。由于上式为单调递减，所以取  $f=0.1$  代入上述式子，计算可得  $F_m = 2020 \text{ N}$  左右，即每个磁性轮的磁力需要 550N 左右。根据在管道全位置焊接时，经分析最不利的情况，也就是需要最大的摩擦力情况是

$$\beta = \arccos \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} = 6.465^\circ \quad (5-5)$$

也就是当  $\alpha = 96.465^\circ$  时，即在立焊微仰的时候，需要最大的磁力。

管道焊接机器人在管道上平衡的另一个条件，是不发生翻转，根据模型图 5-4 可知：

$$F_m \cdot 2c \geq N_1 \cdot 2c + G(e \sin \alpha - c \cdot \cos \alpha) \quad (5-6)$$

临界的条件时， $N_1 \geq 0$ ，也就是

$$F_m \geq \frac{G}{2} \left( \frac{e}{2} \sin \alpha - c \cdot \cos \alpha \right) = \frac{G \sqrt{1+(c/e)^2}}{2} \frac{c/e}{c/e} \sin(\alpha - \gamma) \quad (5-7)$$

式中  $\gamma = \arccos \frac{1}{\sqrt{1+(c/e)^2}}$ 。

所以

$$F_m = \frac{G\sqrt{1+(c/e)^2}}{2c/e} \quad (5-8)$$

由此可以看出，尽力降低管道焊接机器人本体的重心，适当增加前后轮距，有助于减小维持不翻转所需要的磁力。由于  $c/e \gg f$ ，所以按不滑动原则设计磁力大小。考虑到管道焊接机器人在跟踪过程中轮速变化，即有加速度的要求，该力还需要更大一点，也就是乘上一个系数。

采用永磁式车轮更为可靠，保持磁力比较好。虽然磁性轮的磁性在高温下可能损失一部分磁性，但是可以选择工作温度高、磁感应强度较大的材料作为管道焊接机器人磁性轮的磁性材料。要求永久磁材料具有较高的磁性能，也就是  $Br$  和  $Hc$  要求较高，有较低的温度系数，材料磁性能一致性好，尺寸精度高。由于使用条件为高温状态下，故选用增加耐高温材料的钕铁硼。在磁性材料中，被称为磁性材料之王钕铁硼(NdFeB)应当是首选材料。它的特点是具有较高的磁能积，高的矫顽力和极好的性价比<sup>[82]</sup>。

钕铁硼性能参数见表 5-1。

表5-1 钕铁硼Nd15Fe77B8性能参数

Table 5-1 Characteristics of Nd15Fe77B8

性能参数	数值
剩余磁感应强度Br(T)	1.25
磁感矫顽力Hcb (kA/m)	796.0
内禀矫顽力Hcj(kA/m)	875.6
磁能积(B·H)m(kJ/m <sup>3</sup> )	286.5
磁感温度系数α <sub>20~100℃</sub>	-0.126
密度η(g/cm <sup>3</sup> )	7.4
居里点TC(℃)	312
工作温度T(℃)	80

为了能满足上述设计的磁力要求，以便管道焊接机器人能够很好的吸附在管道上，磁性轮由永磁体和磁性导向轮两部分组成，轮体中间部分为轴向

充磁的钕铁硼(NdFeB)稀土材料永磁体。

磁性轮与吸附管道面之间存在气隙,磁通为非均匀分布,磁力的简化计算公式为<sup>[109]</sup>

$$F_c = 10^8 \cdot \left( \frac{B_r}{4965} \right)^2 \cdot S \cdot \frac{1}{1 + a\delta} \quad (5-9)$$

式中  $F_c$ ——磁吸力(kg);  
 $B_r$ ——气隙磁密度(T);  
 $S$ ——磁极表面的总面积( $\text{cm}^2$ );  
 $a$ ——修正系数,经验值为 3~5;  
 $\delta$ ——气隙长度(cm)。

磁引力  $F_c$  越大则滚动阻力矩和滚动阻力越大,有利于管道焊接机器人可靠地停留在管道上不向下滑动和倾翻;但另一方面所需要驱动力矩越大,必须在给定设计要求下确定最佳磁引力。

在磁性轮与管道除了接触是一条线外,其余的磁力是通过之间的气隙传递的,而且之间的气隙是变化的,可以用两个曲面之间的积分算法进行磁力的计算

$$F_c = 2 \times 10^8 \cdot \left( \frac{B_r}{4965} \right)^2 \cdot b \cdot r \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{1 + ar(1 - \cos\varphi)} + \int_0^{\arcsin \frac{r}{R}} \frac{d\phi}{1 + aR(1 - \cos\phi)} \right) \quad (5-10)$$

式中  $b$ ——半个磁性轮母线长;  
 $r$ ——磁性轮的半径;  
 $R$ ——管道半径;  
 $\varphi$ ——磁性轮变化角度;  
 $\phi$ ——管道变化角度。

把式(5-10)简化,可得到每个磁轮的磁吸附力

$$F_c = 4 \times 10^8 \cdot \left( \frac{B_r}{4965} \right)^2 \cdot b \cdot r \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{1 + a(r(1 - \cos\varphi) + R(1 - \cos \arcsin \frac{r \sin \varphi}{R}))} d\varphi \quad (5-11)$$

其中修正系数  $a$  取 3,在计算出所需磁力  $F$  后,查相关表得出磁极表面的总面积,进而可以求出所需要的磁铁体积。

根据实际尺寸,可计算出磁块体积约为  $38\text{cm}^3$ ,最终购置永磁磁块尺寸

为 $\phi 48\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。

为了不改变磁场的分布并减小管道焊接机器人的重量，管道焊接机器人本体采用非导磁性材料，各部分支撑件采用 LY12 的硬铝合金材料加工制造。

**5.2.1.3 驱动功率的计算** 在进行驱动电机功率确定的时候，只考虑管道焊接机器人在管道上做垂直于管道轴向运动的情况，并且磁性轮变形、管道面打滑、空气阻力等因素忽略。假设管道焊接机器人在斜面上运动，对其中任意一个磁性轮进行受力分析。如图 5-5 所示。

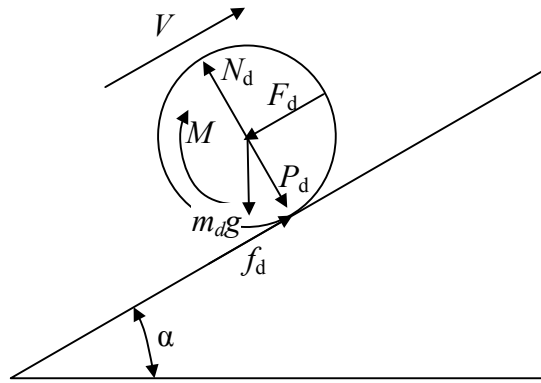


图 5-5 车轮受力分析

Fig.5-5 The analysis of pressured wheel

在图 5-5 中，各参数定义为： $F_d$  为管道焊接机器人对磁性轮的阻力； $N_d$  为管道表面对磁性轮的支持力，其中包括重力的分力( $m_d g \cos \alpha$ )和磁力  $F_c$ ； $V$  为管道焊接机器人本体速度； $M$  为驱动力； $m_d$  为磁性轮质量； $P_d$  为磁性轮所受载荷； $f_d$  为管道对磁性轮的摩擦力。

根据图 5-5 可以得：

$$f_d + m_d g \sin \alpha - F_d = m_d \frac{dV}{dt} \quad (5-12)$$

$$M - f_d r_d = J_d \frac{d\omega_d}{dt} \quad (5-13)$$

式中  $J_d$ ——磁性轮的转动惯量；

$r_d$ ——磁性轮的半径；

$\omega_d$ ——磁性轮的角速度。

因为  $V = r_d \omega_d$ ，可得出：

$$\frac{dV}{dt} = r_d \frac{d\omega_d}{dt} \quad (5-14)$$

联合式(5-12)、(5-13)、(5-14)，可得

$$F_d = \frac{M}{r_d} - (m_d + \frac{J_d}{r_d^2}) \frac{dV}{dt} - m_d g \sin \alpha \quad (5-15)$$

对磁性轮受力分析基础上，对管道焊接机器人本体进行受力分析。本体在斜面上所受磁力和重力的分力与支持力平衡，不予考虑，假设四个磁性轮完全一样，那么根据受力情况可得。

$$4F_d - m_c g \sin \alpha = m_c \frac{dV}{dt} \quad (5-16)$$

式中  $m_c$ ——除车轮外管道焊接机器人的质量。

联合式(5-15)、(5-16)，可得

$$\frac{M}{r_d} = (\frac{1}{4} m_c + m_d) g \sin \alpha + (\frac{1}{4} m_c + m_d + \frac{J_d}{r_d^2}) \frac{dV}{dt} \quad (5-17)$$

根据所要求的管道焊接机器人加速度，可以计算出其所需要的驱动力矩的大小，由于管道焊接机器人在管道上运行时受管道表面状况和磁力的影响，并且考虑到传动效率以及安全性，可以确定所需驱动电机的功率大约为：

$$P = kM \frac{V}{r_d \eta} \quad (5-18)$$

式中  $P$ ——电机功率；

$k$ ——安全系数；

$\eta$ ——机械传动效率。

由此，可以对驱动电机的功率进行选择。代入各参数，计算出所需功率约为 0.2kW。

**5.2.1.4 其它机构** 焊枪调整单元采用步进电机与直线运动单元组成十字滑

块机构，焊接摆动机构采用步进电机与齿轮驱动组成，控制焊枪圆弧摆动。

采用绝对式倾角传感器 LAM-TD-360 安装在机器人车体两侧，实时感知或测取管道焊机所处角度位置，为管道焊接机器人姿态控制、焊接规范参数的自动调整和焊接机器人焊接起停位置的控制提供了必要条件。

图 5-6 为绝对式倾角传感器 LAM-TD-360，工作原理是利用测量重力加速度的分量通过计算将其转为绝对倾角，分辨率 0.1 度，具有零点自动设定功能。



图 5-6 绝对式倾角传感器 LAM-TD-360

Fig.5-6 Absolute obliquity sensor LAM-TD-360

## 5.2.2 视觉传感器

5.2.2.1 元器件选择 视觉传感器包括以下元部件。

(1) 结构光光源选用激光波长为 635nm 的一字线性线光源半导体激光器，提供强的背景光源。其功率为 20mW，发散角大于等于 90°。

(2) CCD 摄像机选用 WAT-902DM2 型号的超低度黑白摄像头。WAT-902DM2 型号 CCD 摄像机的主要参数：有效像素数为 768×949，像素尺寸为  $8.4\mu\text{m} \times 9.8\mu\text{m}$ ，最低照度为 0.0006 Lux F1.4，自动电子快门为 1/60~1/100 000 秒，解析度为 570Lines，信噪比大于 52dB。

(3) 摄像机镜头采用固定焦距为  $f=8\text{mm}$  的工业镜头 M0814-MP，其镜头直径与焦距之比的最大值为 1:1.4，图像的最大尺寸为  $8.8\text{mm} \times 6.6\text{mm}$ ，手动光圈，C 固定架，对象大小为  $107\text{mm} \times 80\text{mm}$ 。

(4) 滤光片选用中心波长为 635nm、带宽  $\pm 10\text{nm}$  的干涉滤光片，其峰

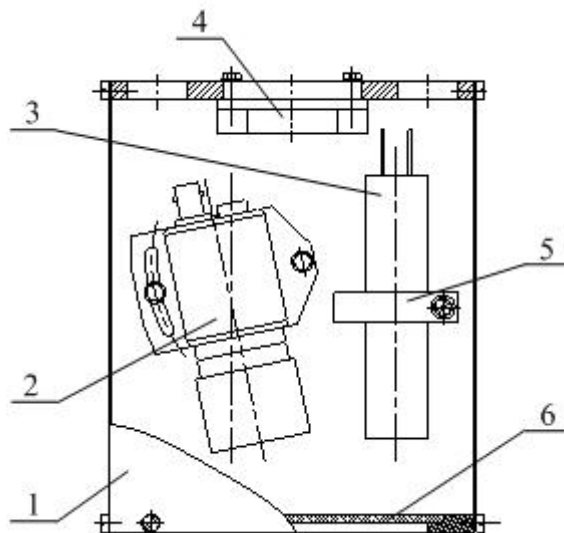
值透光率高达 63%。

(5) 图像采集卡选用大恒图像公司开发的基于 PCI 接口的 DH-CG410 视频采集卡。

**5.2.2.2 结构设计** 根据第 2 章视觉传感器模型，采用激光光带垂直工件、摄像机倾斜接受的结构，为了最大程度地减小弧光的干扰，设置摄像机光轴与激光投射面夹角 $\beta=7^\circ$ 。其结构如图 5-7。

为了适应不同直径的管道焊接，传感器整体角度可以调整，以使激光光带垂直于工件表面。

由于管道环形焊缝采用下向焊焊接工艺，一个圆周焊缝分为左右两半圆分别从上端向下焊接，为了避免焊接机器人频繁调头，设置两个视觉传感器在焊枪两侧对称布置，分别用于两半圆周的跟踪控制。



1.传感器保护壳 2.CCD 摄像机 3.结构光发生器 4.冷却风扇  
5. 结构光发生器固定座 6.防热玻璃

图 5-7 视觉传感器结构

Fig.5-7 The structure of visual sensor

### 5.2.3 管道焊接机器人控制系统

管道全位置环形焊接机器人的测控系统的任务如下：控制小车、垂直调整结构和水平调整机构以完成焊缝的跟踪；控制视觉传感器获取焊缝图像信息，处理后得到焊缝轨迹和截面尺寸；测量绝对式倾角传感器输出以控制焊

接规范参数，保证全位置焊接质量；管道全位置焊接参数管理。

**5.2.3.1 控制系统硬件结构** 本研究采用结构光视觉传感器，控制系统需要处理 CCD 摄像机获取的焊缝图像，以提取焊缝偏差信息，需要处理的信息量大。因此采用 PC 机+运动控制器架构。该系统以工业控制机为平台，以结构光视觉传感器、图像采集卡构成视觉系统，获取焊缝图像信息。以 NI 运动控制卡、接口板和各电机构成运动控制系统，完成焊接小车行走、焊枪水平调整、焊枪垂直调整和视觉传感器角度调整控制；另外，操作面板手动命令可通过工控机和运动控制卡完成对各个运动的手动控制。工控机作为上位机，以 LabVIEW 为平台完成系统管理、视觉信息处理、焊接数据库维护、运动规划、数据传输、运动控制卡在线指令发送，以及对焊接电流、电弧电压的实时调节。其结构原理图如图 5-8 所示。系统硬件由主频 3.0GHz 的一体化工作站 WS-855、电阻式触摸屏，NI 运动控制卡 PCI-7344、多功能数据采集卡、交流伺服电机，结构光视觉传感器、图像采集卡 CG410，绝对式角度传感器等组成。

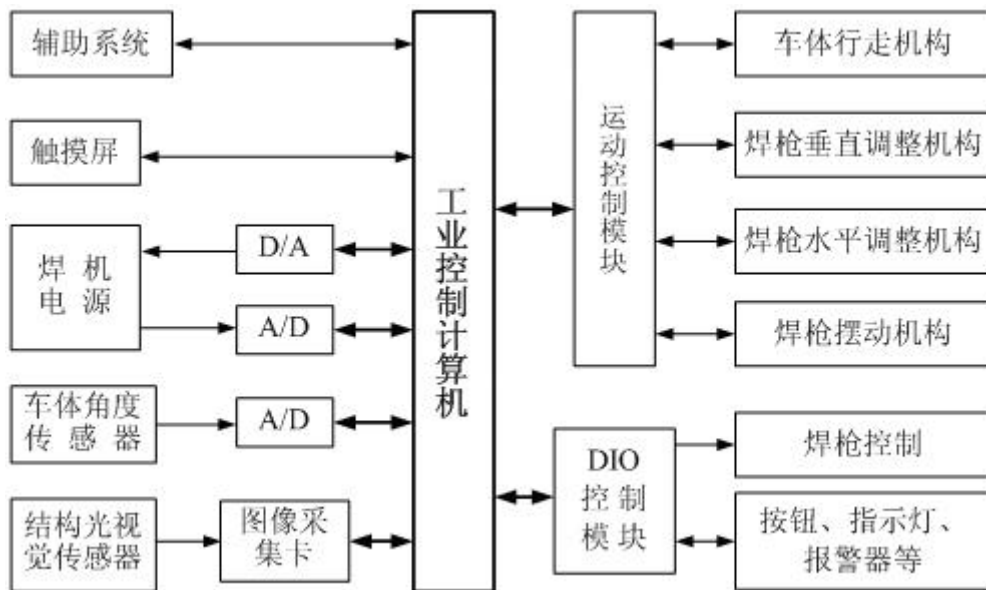


图 5-8 测控系统结构原理图

Fig.5-8 Principle diagram of control system of pipeline welding robot

**5.2.3.2 控制系统软件结构** 该系统软件采用 LabVIEW（Laboratory Virtual instrument Engineering）语言编制。LabVIEW 是一种图形化的编程语言，它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受，被视为一个标准的数据采集



和仪器控制软件。LabVIEW 集成了与满足 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能。使用这种语言编程时，基本上不写程序代码，取而代之的是流程图。它尽可能利用了技术人员、科学家、工程师所熟悉的术语、图标和概念，因此，LabVIEW 是一个面向最终用户的工具，提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时，可以大大提高工作效率。

本研究的控制系统软件由用户操作平台、视觉信息处理模块、运动控制模块、全位置焊接规范参数数据管理模块以及 I/O 模块组成。用户操作平台建立在工控机上，是在 LabVIEW 软件平台上开发的集成控制软件，提供友好的人机对话界面。其主要功能是处理视觉信息，焊枪轨迹生成及运动控制，根据焊缝截面尺寸和焊枪所在位置规划焊接规范参数，全位置焊接参数数据库管理接口，数据 I/O 处理设置、修改和在线调节系统的可控参数，系统状态检测，以及起动、停止、文件处理、直接命令等操作。视觉信息处理模块采用 Visual C++6.0 编制，接受总控系统的控制，并将处理结果上传总控系统。

其测控系统软件结构图如图 5-9 所示，其用户界面如图 5-10 所示。视觉信息图像处理模块用户界面如图 5-11 所示。控制系统软件流程图如图 5-12 所示。

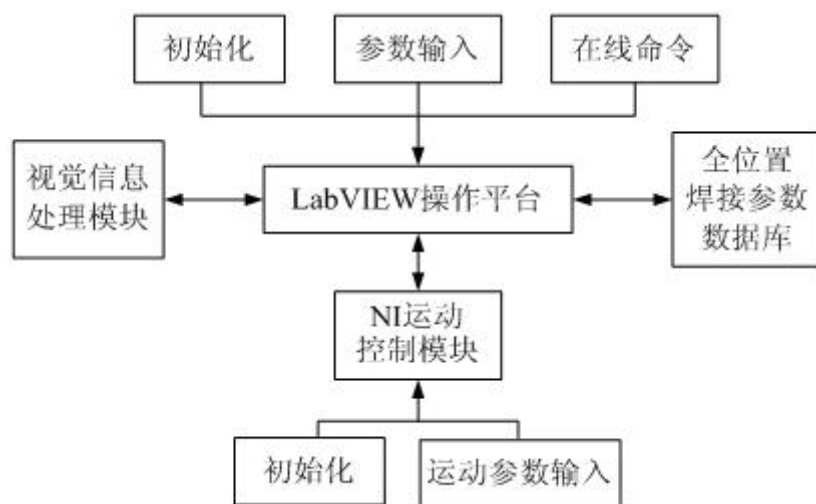


图 5-9 测控系统软件结构图

Fig.5-9 Software principle diagram of wheel-robot for girth-welding of pipeline



图 5-10 测控系统用户界面

Fig.5-10 User interface of wheel-robot for girth-welding of pipeline

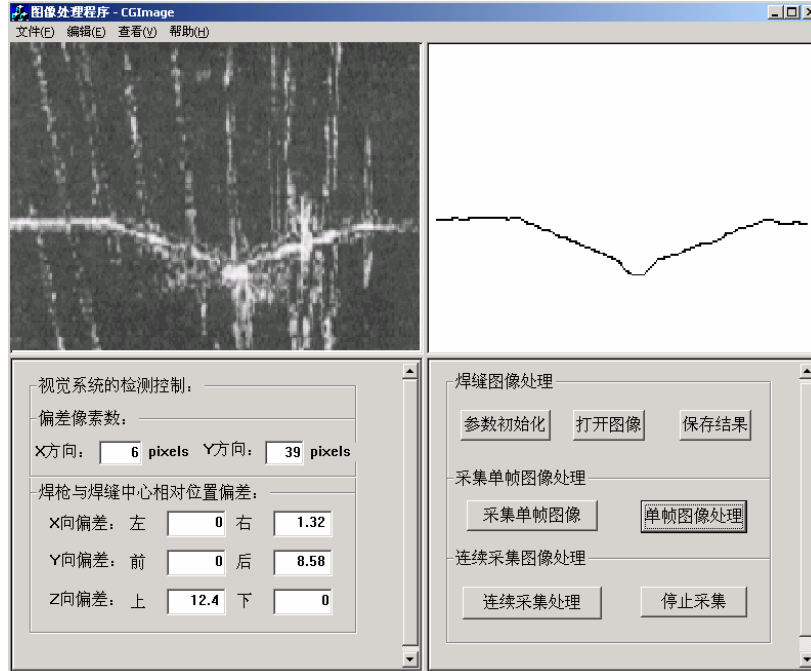


图 5-11 图像处理模块界面

Fig.5-11 User interface of the image processing module

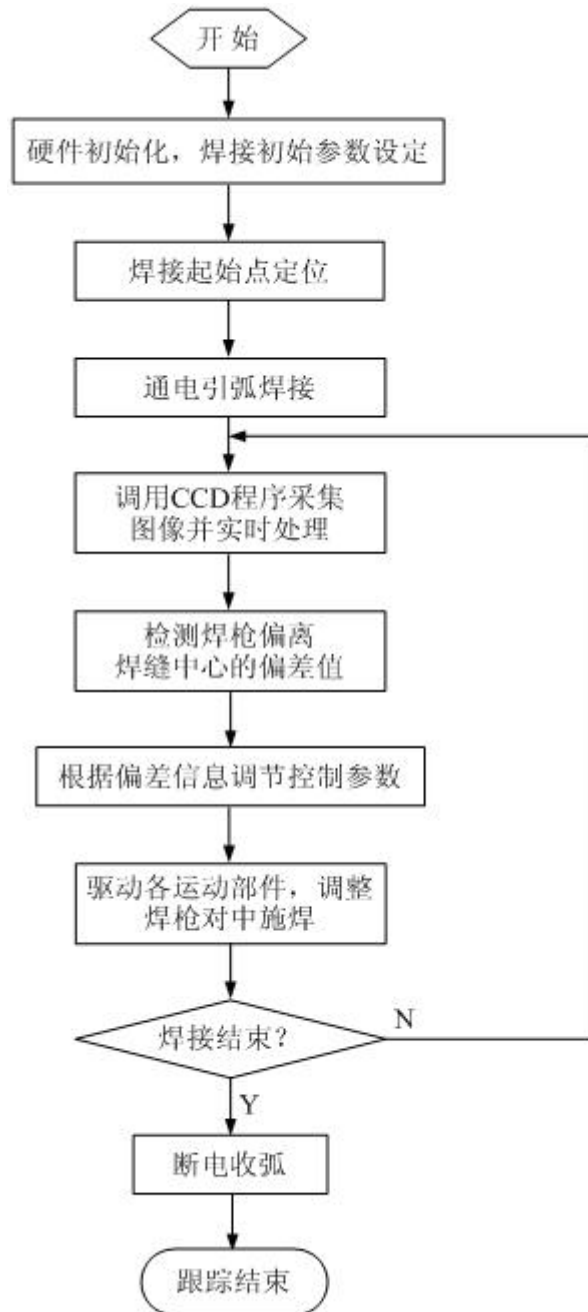


图 5-12 焊缝跟踪控制流程图

Fig.5-12 The flow chats of welding seam tracking

### 5.3 管道焊接机器人焊接跟踪实验

采用本研究研制的管道焊接机器人跟踪系统在实验室环境下进行管道焊接实验，以考察系统工作能力和焊缝跟踪效果。管道焊接机器人系统照片如图 5-13。



图 5-13 管道焊接机器人系统照片

Fig.5-13 Picture of pipeline welding robot system

1. **焊接系统** 焊接系统采用北京时代科技股份有限公司全数字半自动气体保护焊机 NB-500(A161-500)，该焊机应用 IGBT 逆变技术、DSP、模糊控制技术及自适应控制技术，使其具有电源电压适应范围宽、焊接过程稳定，干伸长变化适应性强，采用以送丝速度为对象的一元化调节方式，可以预设焊接电压和送丝速度，适用于钢焊丝、铝焊丝、药芯焊丝和各种焊条的全位置焊接，满足机器人焊接的要求。焊丝采用天津大桥焊材有限公司的气保焊丝，直径 $\phi 1.2\text{mm}$ ，牌号为 THQ50-4。采用 100%CO<sub>2</sub> 气保护。

2. **焊接试件** 焊接模拟试件为一段带有 V 形槽的  $\Phi 660\text{mm} \times 20\text{mm}$  的厚壁管，材质为 Q235，如图 5-14。V 形槽的角度有三种  $2\alpha=60^\circ$ 、 $2\alpha=45^\circ$ 、 $2\alpha=30^\circ$ ，如图 5-15。

3. **管道环缝焊接工艺参数与焊接规划** 本研究中采用下向焊方法进行管道全位置焊接。把管道的一周分成若干个子段，采用直线差补和均匀样条插值的方法，有效地解决了全位置焊接过程中的工艺参数平滑过渡控制过

程，从而保证了系统的稳定、可靠运行。

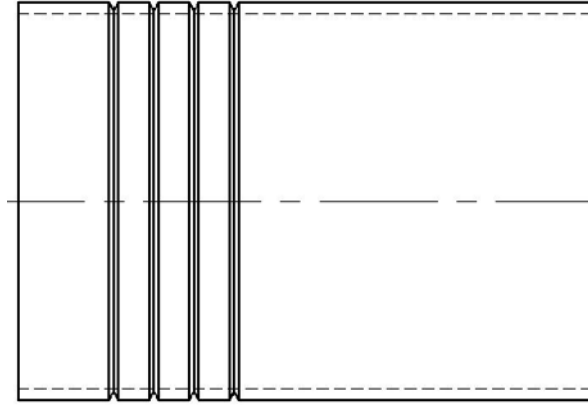


图 5-14 焊接工艺试件示意图

Fig.5-14 Work-piece for welding process experiments

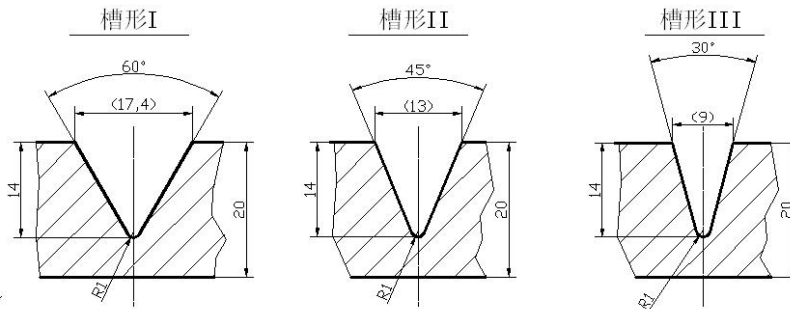


图 5-15 V 形槽槽型

Fig.5-15 Cross section of V type grooves

如图 5-16，本系统将整个焊道的半圆周分成 6 个大段，每个大段为 30 度，再细分成 60 个小段。焊接时，只需要输入该焊道的焊接参数以及 6 个大段的典型焊接速度，然后控制系统利用 5 次多项式插值法，由高速的工控机自动计算出其余各个点的焊接速度，从而实现焊接速度光滑连续变化。

焊接过程中，从 0 点到 2 点的焊接，具有平缝焊接的特点，焊接电压高，电流大；而从 2 点到 4 点具有立缝焊接的特点，熔池不易稳定，铁水下坠，焊接速度相对较快；从 4 点到 6 点具有仰缝焊接的特点，铁水下坠，焊接电压较低，电流较小，焊接速度相对较慢。

长输管道管壁厚度较大，需要多层多道焊接，规划出多层多焊道的圆弧轨迹，确定起弧点和熄弧点。根据焊接的要求，每道圆弧的熄弧点与起弧点有一定的搭接，并且上一层焊道圆弧的搭接区域不能与下一层焊道圆弧的搭

接区域重合，否则会产生应力集中，影响到整体的焊接质量。假设管道的焊缝需要四层填充满焊道，那么焊接情况如图 5-17 所示。

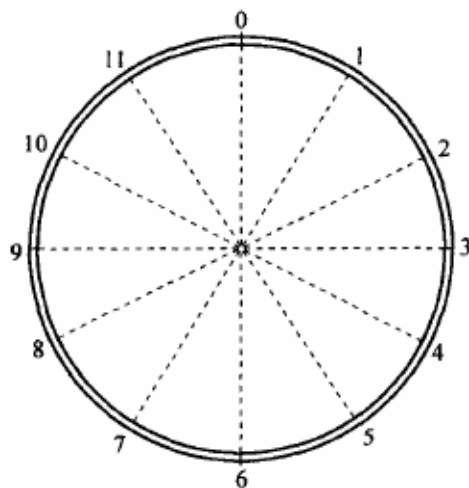


图 5-16 管口的空间分段

Fig.5-16 Spatial subsections of pipe

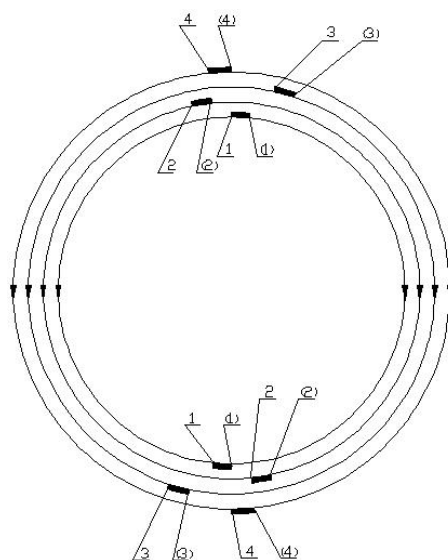


图 5-17 多层焊道的焊道搭接示意图

Fig.5-17 Join of beads of multi-layers

每层焊道由左右两半个下向焊道组成，每个焊道起弧点均在上部，熄弧

点在下部，左右两半个焊道的起弧点和熄弧点具有一定的搭接。焊完半周焊道后需打磨搭接区域，使整周焊道高度相等，以免影响下一层焊道的焊接。

本课题中采用的焊接工艺参数如表 5-2。跟踪实验中采用的焊接速度曲线如图 5-18 所示。

表 5-2 管道环焊工艺参数

Table 5-2 Process parameters of pipeline welding

尺寸	焊道	电压 U/V	电流 I/A	焊接速度 $v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	摆速 $v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
$\Phi 660\times 14$	根焊	21.5~23.0	150~170	160~220	—
	填充 1	22.0~24.5	180~220	280~340	19~27
	填充 2	22.0~24.5	180~220	260~320	19~27
	盖面	22.0~24.5	180~220	200~260	27~39

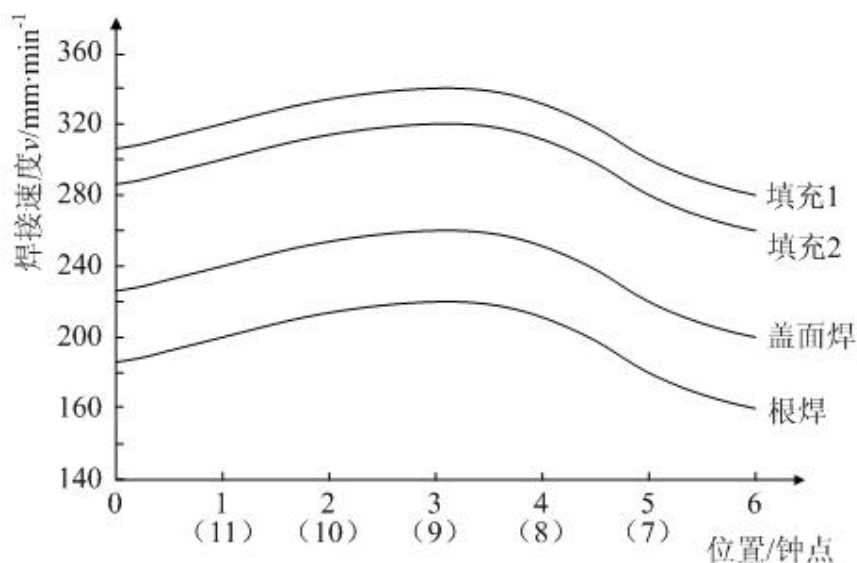


图 5-18 跟踪实验中采用的焊接速度曲线

Fig.5-18 Welding speed curves in seam tracking experiments

**4. 焊缝跟踪实验** 为了验证焊接机器人在实际焊接条件下的跟踪效果，对不同角度坡口的环形焊缝进行了焊接跟踪实验。实验证明，在这些情况下均能完成可靠跟踪。图 5-19 为焊缝跟踪实验的照片。

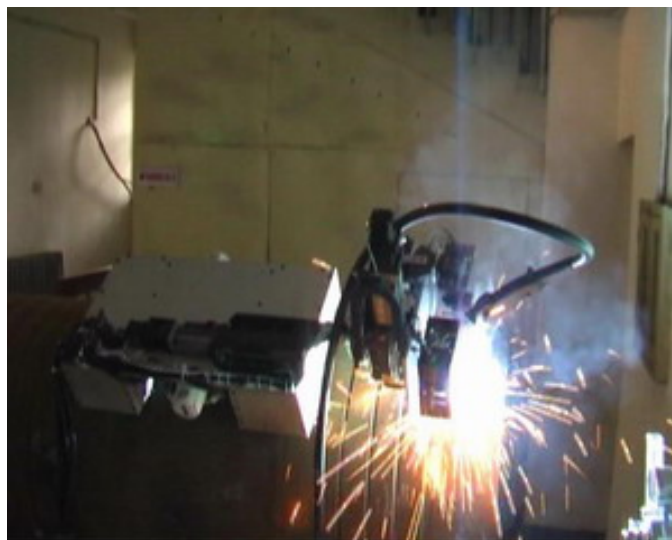
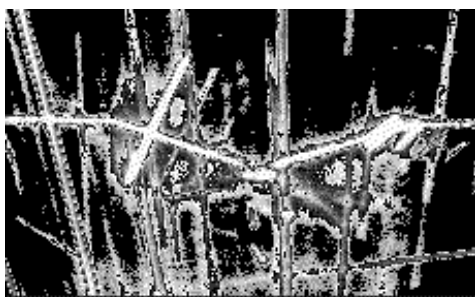


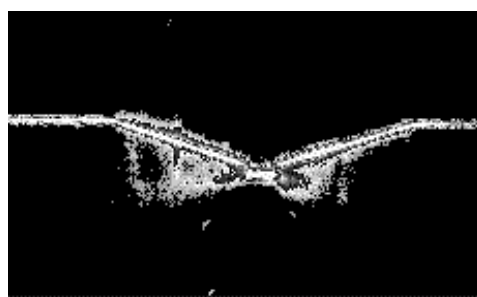
图 5-19 焊缝跟踪实验的照片

Fig.5-19 Picture of welding experiment

由图 5-20 a)可以看出，由于采取了有效的组合滤波处理和采用 30mW 的激光二极管照明的措施，使得激光光带的亮度要比电弧闪烁的亮度高很多，从而大大地提高了抗干扰能力；尽管飞溅的亮度与激光光带的亮度相当，甚至有的还要比激光光带的亮度高，但是由于采用了连续采集两幅图像并做与处理的飞溅处理措施，因此去除飞溅的效果非常显著，如图 5-20 b)所示；再经第 3 章给出的组合预处理和焊缝图像形态学细化等一系列后续处理后，得到最终的结果如图 5-21 所示，处理效果理想。经大量实验证实，该系统处理的成功率接近 100%。



a)原始图像



b) 去飞溅处理后的图像

图 5-20 自动焊接时的焊缝图像

Fig.5-20 Seam images in automatic welding



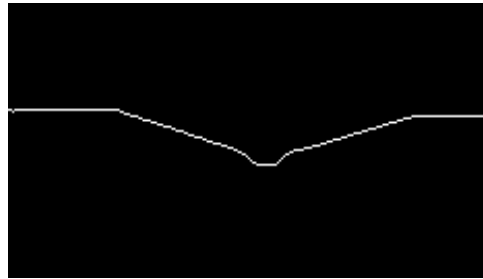


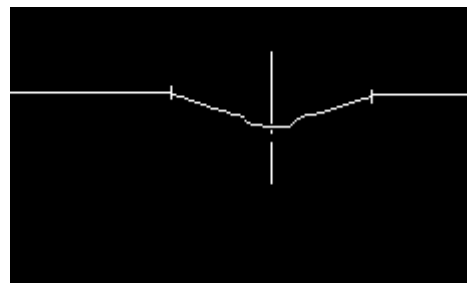
图 5-21 处理后的结果

Fig.5-21 The result after process

由图 5-22 和图 5-23 可以看出，即使在焊缝即将被填充后仍然能够很准确地提取出焊缝的边缘和中心位置等特征参数。



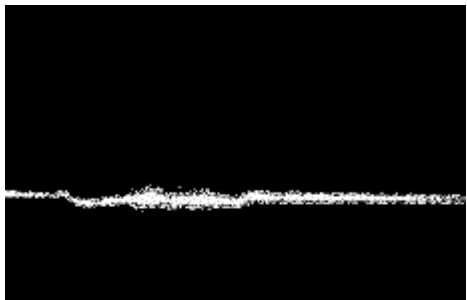
a)焊接前的图像



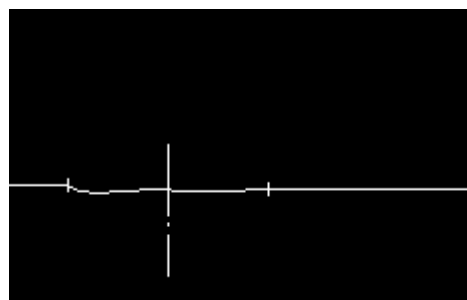
b) 焊缝的特征点提取

图 5-22 未焊接的图像处理

Fig.5-22 Image process without welding



a)焊接过程中的图像



b) 焊缝的特征点提取

图 5-23 焊接过程中的图像处理

Fig.5-23 Image process in welding

为了验证图像处理和跟踪控制软件的抗干扰能力，首先在不开焊机的情况下，让跟踪系统自动检测、跟踪焊缝，这样得到一组在没有焊接干扰条件下的焊缝轨迹的数据；然后，跟踪系统退回原位，在实际焊接条件下跟踪同

一道焊缝，得到另一组焊缝轨迹的数据。在下向焊 0 点位置为角度起始点，每 10 度记录横向位置，比较这样两组数据，就可以看出跟踪系统软件在实际焊接的恶劣条件下的抗干扰性的好坏。图 5-24 是填充 1 焊道在两种条件得到的曲线。

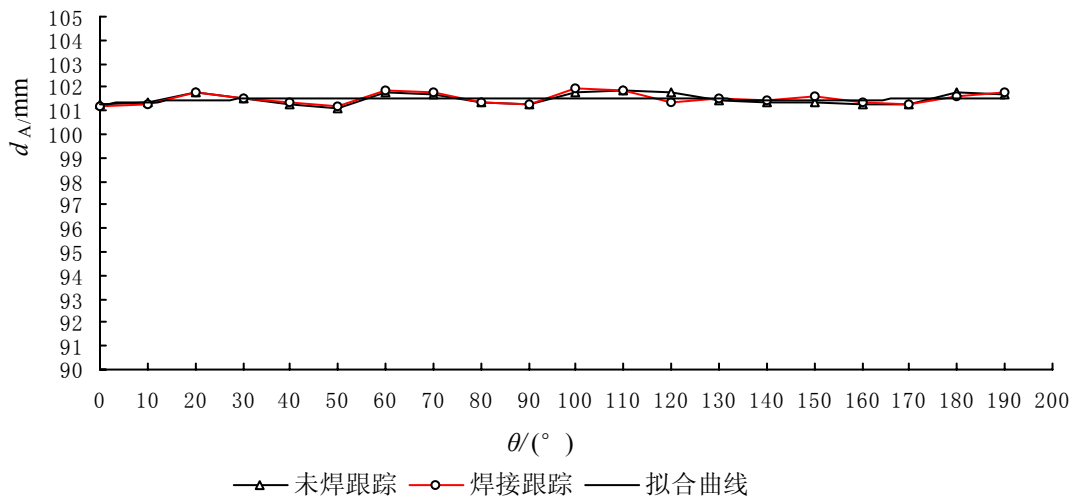


图 5-24 填充 1 焊道未焊和焊接时跟踪轨迹比较

Fig.5-24 Compare of Seam tracking with welding and no-welding

由图 5-24 可以看出：焊接的弧光对像处理系统影响不大，不会影响跟踪的精度。跟踪轨迹与理想轨迹的误差在 $\pm 0.4\text{mm}$ 之内，比较图中焊接跟踪和未焊跟踪两条曲线，相差也在 $\pm 0.4\text{mm}$ 之内，说明实际焊接过程中，烟尘、弧光和大量的飞溅对图像处理和跟踪控制软件的影响很小，跟踪系统的抗干扰能力很强，能很好地满足焊的要求。

**5. 实验结果** 我们对坡口角度  $2\alpha=60^{\circ}$ 、 $2\alpha=45^{\circ}$ 、 $2\alpha=30^{\circ}$  的三种环形焊缝进行了焊接跟踪实验。采用半圆周下向焊，将左右半圆各分为 6 个区，采用不同的焊接工艺参数，以保证全位置焊接的质量。

图 5-25 为  $2\alpha=45^{\circ}$ 、 $2\alpha=30^{\circ}$  坡口根焊的各段焊接后的照片，图 5-26 为  $2\alpha=45^{\circ}$  坡口填充焊道的照片。由这些照片可以看出在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。

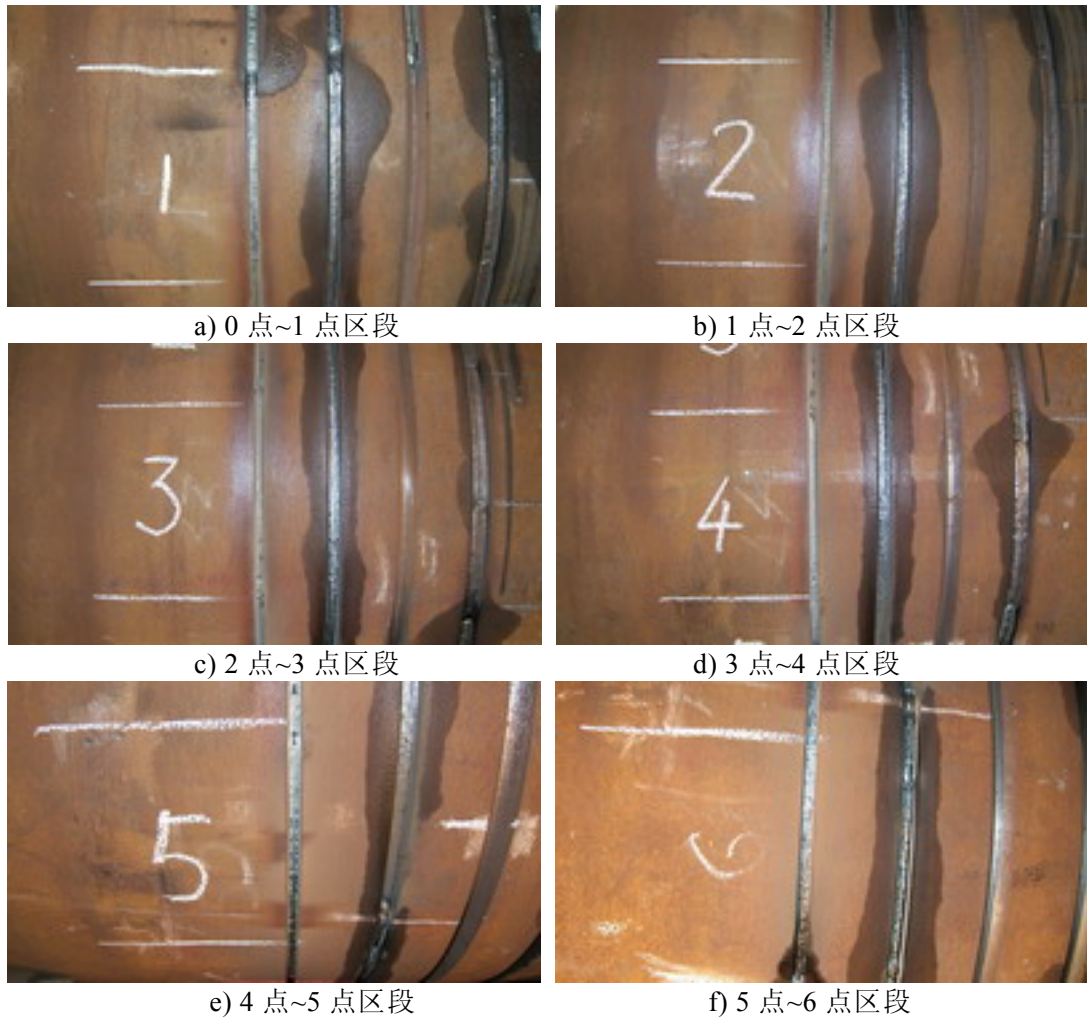


图 5-25 各区段焊接结果  
Fig.5-25 Welding result in different subsections



实验表明,该管道焊接机器人跟踪系统视觉传感器及焊缝图像处理软件抗弧光等干扰能力强,焊接速度可根据焊接工艺调整,跟踪可靠,抗干扰性强,精度高,可以满足大口径输送管道环形对接焊缝的全位置自动化焊接的需要。

## 5.4 本章小结

本章首先设计了管道焊接机器人的行走单元、磁轮结构、视觉传感器以及控制系统硬件、软件,构建一个完整管道焊接机器人跟踪系统。利用所研制的管道焊接机器人跟踪系统进行了管道全位置焊接的焊缝跟踪实验。实验表明视觉传感器和图像处理系统抗干扰能力强、处理速度快、性能可靠,跟踪系统控制算法以及控制方法切实有效,跟踪精度 $\pm 0.4\text{mm}$ 。

该管道焊接机器人系统在实验室条件下,能够满足管道全位置焊接工艺对运动参数的要求,跟踪精度满足实际焊接需要。

## 结 论

长输管道建设中应用焊接机器人焊接管道环形对接焊缝是提高管道焊接质量和生产效率的有效途径。本文在天津市科技发展计划应用基础研究基金重点项目“管道环型焊接机器人的研制”的资助下,针对大型油气输送管道(直径 $\geq \Phi 600\text{mm}$ )现场施工条件下焊接机器人跟踪系统相关关键技术进行了深入的理论和实验分析,研制出基于视觉管道焊接机器人跟踪系统。

论文取得主要创新点和成果如下:

1. 应用光度学理论,结合光学成像系统与带通滤光片的作用,推导出视觉传感器输出灰度图像的弧光干扰模型,指导结构光视觉传感器设计过程中传感检测位置以及摄像机倾角等参数的确定,减少弧光干扰,有效地提高了焊缝图像的信噪比。

2. 针对结构光焊缝图像的特点,采用基于先验知识改进最大方差阈值分割方法,并与一维离散 LoG 滤波、邻域均值滤波和标记法小区域去噪处理组成图像预处理组合方法,快速获得清晰的焊缝图像,可靠提取焊缝特征信息。结果证明,采用该预处理方法使焊缝跟踪系统抗干扰性强、图像处理质量好,处理一幅像素  $400\times 300$  图像的时间不大于 0.08 秒,满足管道焊缝跟踪的需要。

3. 提出了基于圆柱坐标的管道焊接机器人环形焊接焊缝跟踪算法,并给出当管道焊接机器人车轮轴线与管道轴线存在偏角时的跟踪补偿量,有效提高焊缝跟踪精度。

4. 研制了焊枪侧置形式的管道焊接机器人样机,与骑跨式结构相比,使焊缝跟踪精度不受管道对口精度的影响,并可以实现管道弯角对接焊缝的焊接,扩大了该管道焊接机器人跟踪系统的工作范围。

针对基于视觉管道焊接机器人跟踪系统的研究,本文还进行了以下几方面的工作:

1. 成功地研制了一套基于结构光焊缝跟踪视觉传感器。

2. 搭建了由工控机、电阻式触摸屏,多轴运动控制卡、多功能数据采集卡、图像采集卡、交流伺服控制器等组成的管道焊接机器人控制系统。

3. 采用 Visual C++6.0 编制了焊缝图像处理软件;基于 LabVIEW 软件平台编制由用户操作管理、运动控制、图像采集、焊缝图像处理模块管理、全位置焊接参数数据管理以及 I/O 模块等组成的控制系统软件。

尽管本课题研制出管道焊接机器人样机，实现管道焊缝跟踪控制，并且通过天津市科委组织的项目鉴定，但是该管道焊接机器人距实用化仍有一定距离，作者认为今后应从以下几方面进一步研究：

1. 应用 DSP 技术、嵌入式系统等，编制专用软件系统，减小控制系统体积，以适合野外现场的管道焊接。
2. 结合当前管道焊接工艺，深入研究适合机器人的自动焊接工艺，建立焊接工艺专家系统，实现焊接参数自动生成。
3. 在野外实际生产现场进行大量实验，发现存在问题，改进软件功能，优化本体结构，最终实现实用化。

## 参考文献

- 1 蔡鹤皋. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点. 中国机械工程. 2000, 11(1-2): 58-60
- 2 H. R. Nicholls, M. H. Lee. A Survey of Robot Tactile Sensing Technology. The International Journal of Robotics Research. 1989, 8(3): 3-30
- 3 P. Drews, G. Starke. Welding in the Century of Information Technology. Welding in the World. 1994, 34: 1-20
- 4 Trailer. Manufacturer Depends on Robotic Welding to Boast Production. Welding Journal. 1995, 74(7): 49-51
- 5 蒋新松. 未来机器人技术发展方向的探讨. 机器人. 1996, 18(5): 287-291
- 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. Proc. InstnMech. Engrs, Part B: J. Engineering Manufacture. 2002, 216(B6): 911-920
- 8 T. Araya, S. Saikawa. Recent Activities on Sensing and Adaptive Control of Arc Welding. In 3rd International Conference on Trends in Welding Research. Gatlinburg, June 1992: 833-842
- 9 P. Drews, G. Starke, K. Willms. The Current State of Development of Sensors for Gas-Shielded Welding Robots. Welding and Cutting. 1990, 36(4): 57-59
- 10 J. E. Agapakis, J. M. Katz, M. Koifman, et al. Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry. Weld. J. 1986, 65(11): 33-41
- 11 刘永, 王克鸿. IGM 弧焊机器人大型工作站仿真系统设计. 焊接学报. 2006, 27(2): 59-63
- 12 符娅波, 边美华, 许先果. 弧焊机器人的应用与发展. 机器人技术与应用. 2006, (3): 38-41
- 13 王敏捷, 姜淑兰, 王勇. 世界管道建设综述. 国外油田工程. 2005, 21(7): 26-32

- 14 V. D. Makarenko, S. P. Shatilo and I. O. Makarenko. Welding Nonrotating Joints in Petroleum Pipelines. Chemical and Petroleum Engineering. 2004, 40(s): 5-6
- 15 杨俊伟, 李岩. 全位置自动焊接在管道建设中的应用. 油气储运. 2001, 20(12): 27-28
- 16 <http://www.crc-evans.com/AW/externalwm.htm>
- 17 梁君直, 曾惠林, 闫政. 高效焊接与管道施工. 高效焊接国家论坛论文集. 2002: 174-177
- 18 王军波, 孙振国, 陈强, 等. 基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝跟踪. 焊接学报. 2001, 22(2): 31-34
- 19 潘际奎, 阎炳义, 高力生, 等. 爬行式全位置弧焊机器人. 电焊机. 2005, 35(6): 1-5
- 20 闫政, 梁君直, 陈江. PAW200 管道全位置自动焊机. 2005, 35(6): 47-53
- 21 胡安鑫, 苏欣, 孙华锋, 等. 国内外长输管道自动焊现状. 天然气与石油. 2006, 24(2): 12-14, 18
- 22 <http://www.riet.com.cn/jishuly/hanjie.htm>
- 23 王伟, 薛龙. 全位置管道焊接设备的研究. 管道技术与设备. 2002, (4): 15-16
- 24 H. C. Kuo, L. J. Wu. An Image Tracking System for Welded Seams Using Fuzzy Logic. Journal of Materials Processing Technology. 2002, 120(1-3): 169-185
- 25 G. Bolmsjo, M. Olsson and P. Cederberg. Robotic Arc Welding Trends and Developments for Higher Autonomy. The Industrial Robot. 2002, 29(2): 98-104
- 26 Asai. Present State and Future Development of Sensing and Monitoring Systems for Welding. Journal of High Temperature Society. 2005, 31(2): 100-111
- 27 J. W. Kim, S. J. Na. A Study on an Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillet Joints. Weld Journal. 1991, 70(8): 216-221
- 28 M. Ushio, W. J. Mao. Modeling of the Arc Sensor for DC MIG/MAG Welding in Open Arc Mode-A Study of the Improvement of the Sensitivity and the Reliability of the Arc Sensor in GMA Welding(1st Report). Quarterly Journal of the Japan Welding Society. 1996, 14(1): 99-107



- 29 M. Kodama. Automatic Fillet Welding Process with High Frequency Oscillation Arc Sensor. Proc. Conf. IIW. 2003, Doc. XII: 1766-1793
- 30 潘际銮. 电弧传感器物理数学模型研究. CMES Doc. H-X II : 13-90
- 31 吴世德. 电弧传感器焊缝跟踪的信息处理技术. 清华大学博士论文. 1997
- 32 洪波. 电弧传感移动式焊接机器人的数学建模及仿真. 湘潭大学博士论文. 2005
- 33 D. C. Kim, S. H. Rhee and K. W. Um. A Study of Welding Pool Width Control in Gas Tungsten Arc Welding Using the Digital Image Processing. J. KSME(A). 1996, 20(9): 2760-2769
- 34 J. Testa. The Vision-Guide Robot Grows up Industrial Robot. An Industrial Journal. 1999, 26(5): 15-18
- 35 K. Bae, T. H. Lee and 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(1-3): 458-465
- 36 G. J. Zhang, Z. H. Yan and L. Wu. Visual Sensing of Weld Pool in Variable Polarity TIG Welding of Aluminum Alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006, 16(3): 522-526
- 37 L. P. Li, S. B. Chen and T. Lin. The Modeling of Welding Pool Surface Reflectance of Aluminum Alloy Pulse GTAW. Materials Science and Engineering A. 2005, 394(1-2): 320-326
- 38 S. Satoru. Sensing Technology for the Welding Process. Welding International. 2006, 20(3): 183-196
- 39 张虢, 马兆瑞, 郑军, 等. 结构光视觉焊缝跟踪传感器光学系统的研究. 电焊机. 2006, 36(3): 22-26
- 40 N. Shibata, A. Hirai, Y. Takano, et al. Development of Groove Recognition Algorithm with Visual Sensor. Welding Research Abroad. 2000, 46(6): 9-17
- 41 石永华, 钟继光, 刘桑王, 等. 视觉传感及图像处理技术在焊接中的应用. 电焊机. 1999, 29(9): 1-4
- 42 王伟, 邹奇仕, 朱六妹, 等. 传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨. 电焊机. 2002, 32(5): 1-8
- 43 Kiyohara, Hisakai. High Function Arc Welding Robot with Laser Sensor. Proc. Conf. National Conference. Welding Society. 1997: 61-100

- 44 G. Agapiou, C. Kasiouras and A. A. Serafetinides. A Detailed Analysis of the MIG Spectrum for the Development of Laser-Based Seam Tracking Sensors. *Optics and Laser Technology*. 1999, 31:157-161
- 45 张明路, 丁承君, 段萍. 移动机器人的研究现状与趋势. *河北工业大学学报*. 2004, 33(2): 110-115
- 46 欧青立, 何克忠. 室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究. *机器人*. 2000, 22(6): 519-526
- 47 G. Bourhis, O. Hom. An Autonomous Vehicle for People with Motor Disabilities. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2001, 8(1): 20-28
- 48 G. Antonelli, S. Chiaverini and N. Sarkar. External Force Control for Underwater Vehicle-Manipulator Systems. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*. 2001, 17(6): 931-938
- 49 K. Tcbon, R. Muszynski. Instantaneous Kinematics and Dexterity of Mobile Manipulators. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, California. 2000, 3: 2493-2498
- 50 Q. Huang, S. S. Katol. Stability Control for a Mobile Manipulator Using a Potential Method. *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1994, 2: 839-846
- 51 S. Dubowsky, E. E. Vance. Planning Mobile Manipulator Motions Considering Vehicle Dynamic Stability Constraints. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. 1989, 3: 1271-1276
- 52 H. Qiang, S. S. Katol and K. Tanie. Motion Planning for a Mobile Manipulator Considering Stability and Task Constraints. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. 1998, 3: 2192-2198
- 53 M. T. Mason, D. K. Pai, D. Rus, et al. A Mobile Manipulator. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. 1999, 3: 2322-2327
- 54 E. PaPadopoulos, J. Poulakakis. Planning and Model-based Control for Mobile Manipulators. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2000, 3: 1810-1815
- 55 H. G. Tanner, S. G. Loizou and K. J. Kyriakopoulos. Nonholonomic Navigation and Control of Cooperating Mobile Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2003, 19(1): 53-64
- 56 J. Albaric, R. Zapata. Motion Planning of Cooperative Nonholonomic

- Mobile Manipulators. Proceedings of International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2002, 6: 328-333
- 57 Y. Suga , A. Muto. Automatic Tracking of Welding Line by Autonomous Mobile Robot for Welding of Plates ( Tracking of Linear and Angled Welding Lines) . Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(Part C). 1997, 612 (63): 2918-2924
- 58 B. O. Kam , Y. B. Jeon. Motion Control of Two Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking Sensor. ISIE, 2001: 850-856
- 59 S. Dubowsky, P. Y. Gu and J. F. Deck. The Dynamic Analysis of Flexibility in Mobile Robotic Manipulator Systems. Proceedings of the Eighth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Prague, Czechoslovakia. August, 1990
- 60 O. Khatib. Mobile Manipulation: The Robotic Assistant. Robotics and Autonomous Systems. 1999, 26: 175-183
- 61 W. S. Yoo, J. D. Kim and S. J. Na. A Study on a Mobile Platform-Manipulator Welding System for Horizontal Fillet Joints. Mechatronics. 2001, 11(7): 853-868
- 62 H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos and N. I. Krikelis. Advanced Agricultural Robots: Kinematics and Dynamics of Multiple Mobile Manipulators Handling Non-Rigid Material. Computers and Electronics in Agriculture. 2001, 31(1): 91-105
- 63 王军波, 孙振国, 陈强, 等. 基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝跟踪. 焊接学报. 2001, 22(2): 31-34
- 64 焦向东, 蒋力培, 薛龙, 等. 球罐全位置焊接机器人智能控制系统. 焊接学报. 2000, 21(4): 1-5
- 65 熊光明, 龚建伟, 徐正飞, 等. 轮式移动机器人滑动转向研究综述. 机床与液压. 2003, (6): 9-12
- 66 P. K. Khosla, C. P. Neuman and F. B. Prinz. An Algorithm for Seam Tracking Applications. Int. J. Robot Res. 1985, 3(1): 46-54
- 67 潘沛霖, 韩秀琴, 赵言正, 等. 日本磁吸附爬壁机器人的研究现状. 机器人. 1994, 14(6): 379-382
- 68 王宝光, 贺忠海, 陈林才, 等. 结构光传感器模型及特性分析. 光学学报. 2002, 22(4): 481-484

- 69 尤政, 胡庆英. 结构光传感器的成像分析及其数学模型. 宇航计测技术. 1997, 17(4): 5-8
- 70 A. Satoru, T. Kushi and K. Katsumi. Development of Fully Automatic GMAW System with Visual Sensor. IIW Doc. XII-1546, International Institute of Welding, Vienna. 1998: 245-272
- 71 R. Neipold, F. Brummer. In Robotic Welding. (Ed. J. Lane), Bedford, UK, Ifs (Publications) Ltd. 1987: 129-140
- 72 S. B. Chen, X. Z.Chen and T. Qiu. Acquisition of Weld Seam Dimensional Position Information for Arc Welding Robot Based on Vision Computing. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2005, 43: 77-97
- 73 岳宏, 孙立新, 蔡鹤皋. 基于结构光的机器人焊接实时图像处理方法的研究. 机器人. 1999, 21(2): 144-147
- 74 S. D. Zenzo. Advances in Image Segmentation. Image and Vision Computing. 1983, 1(4): 196-21
- 75 R. M. Haralick, L. G. Shapiro. Survey: Image Segmentation Techniques. Computer Vision, Graphics and Image Processing. 1985, 29:100-132
- 76 N. R. Pal, S. K. Pal. A Review on Image Segmentation Techniques. Pattern Recognition. 1993, 26(9): 1277-1294
- 77 应俊, 叶秀清, 顾伟杭. 一个基于知识的边沿提取算法. 中国图像图像学报. 1999, 4A(3): 239-242
- 78 靳宏磊, 朱蔚萍, 李立源, 等. 二维灰度直方图的最佳分割方法. 模式识别与人工智能. 1999, 12(3): 329-333
- 79 S. H. Park, L. D. Yun and S. U. Lee. Color Image Segmentation Based on 3-D Clustering: Morphological Approach. Pattern Recognition. 1998, 31(8): 1061-1076
- 80 P. Schmid. Segmentation of Digitized Dermatoscopic Images by Two Dimensional Color Clustering. IEEE Trans. On Medical Imaging. 1999, 18(2): 164-171
- 81 胡世英, 周源华. 模糊选择多分辨率 Kohonen 聚类网络用于灰度图像分割. 电子学报. 1999, 27(10): 34-37
- 82 I. Grinias and G. Tziritas. A Semi-Automatic Seeded Region Growing Algorithm for Video Object Localization and Tracking. Signal Processing: Image Communication. 2001, 16(10): 977-986

- 
- 83 尹平, 王润生. 基于边缘信息的分开合并图像分割算法. 中国图像图形学报. 1998, 3A(6): 450-454
- 84 毕凌燕, 余英林. 基于 XYZ 空间的区域生长法分割图像. 计算机工程与应用. 2003, 17: 56-57
- 85 J. P. Wang. Stochastic Relaxation on Partitions with Connected Components and Its Application to Image Segmentation. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998, 20(8): 619-636
- 86 张炯, 吴林. 一种识别薄板对接接头的视觉方法. 材料科学与工艺. 1997, (2): 45-47
- 87 徐晓夏, 陈泉林. 基于视频的车辆检测中阈值分割算法的改进. 信息技术. 2005, (9): 10-12
- 88 李亮玉. 微机控制的焊缝自动跟踪系统. 工业控制计算机. 1994, (2): 17-19
- 89 杨淑莹, 边奠英. VC++图像处理程序设计. 北京: 清华大学出版社, 2003: 163
- 90 P. A. Maragos, R. W. Schafer. Morphological Skeleton Representation and Coding of Binary Images. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1986, 34(5): 1228-1244
- 91 D. T. Lee. Medial Axis Transformation of a Planar Shape. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982, 4(4): 363-369
- 92 D. Shaked, A. M. Bruckstein. The Curve Axis. Computer Vision and Image Understanding. 1996, 63(2): 367-379
- 93 H. I. Choi, S. W. Choi, H. P. Moon, et al. New Algorithm for Medial Axis Transform of Plane Domain. Graphical Models and Image Processing. 1997, 59(6): 463-483
- 94 T. C. Lee, R. L. Kashyap. Building Skeleton Models via 3-D Medial Surface/Axis Thinning Algorithms. CVGIP: Graphical Models and Image Processing. 1994, 56(6): 462-478
- 95 S. Lobregt, P. W. Verbeek and F. C. Groen. A Three-Dimensional Skeletonization: Principle and Algorithm. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980, 2(1): 75-77
- 96 R. Kimmel, D. Shaked and N. Kiryati. Skeleton via Distance Maps and

- Level Sets. *Computer Vision and Image Understanding*. 1995, 62(3): 382-391
- 97 F. Leymarie, M. D. Levine. Simulating the Grassfire Transform Using an Active Contour Model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992, 14(1): 56-75
- 98 D. Ivanov, E. Kuzmin and S. Burtsev. An Efficient Integer-based Skeletonization Algorithm. *Computers and Graphics*. 2000, 24(1): 41-51
- 99 寇忠. 油气长输管道常用直径研究. *石油规划设计*. 2005, 16(3): 16-18
- 100 J. L. Overholt, K. C. Cheok and G. E. Smid. Behaviorist-Based Control of an Autonomous Skid-Steer Robot Using Threshold Fuzzy Systems. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*. 2001, 4364: 39-50
- 101 K. R. Weiss. Skid-Steering. *Automobile Engineer*. 1971, 61(4): 22-25.
- 102 K. Kozłowski, D. Pazderski. Modeling and Control of 4-Wheel Skid-Steering Mobile Robot. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2004, 14(4): 477-496
- 103 L. Caracciolo, A. D. Luca and S. Iannitti. Trajectory Tracking Control of a Four-Wheel Differentially Driven Mobile Robot. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Detroit, MI. 1999: 2632-2638
- 104 D. Pazderski, K. Kozłowski and W. E. Dixon. Tracking and Regulation Control of a Skid Steering Vehicle.  
<http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/119373.pdf>
- 105 熊光明, 曹晓燕, 高峻峣, 等. 基于速度的轮式滑动转向移动机器人航向跟踪. *北京理工大学学报*. 2004, 24(8): 663-666
- 106 薛龙, 姚斌, 李明利. 球罐焊接机器人行走机构的磁轮研制. *机械加工与自动化*. 2002, (9): 11-12
- 107 王书铨, 宫海, 王义杰, 等. 一种磁吸附壁面移动机构. *机器人*. 1995, 17(1): 21-24
- 108 郑学家. 第三代永磁体—钕铁硼. *辽宁化工*. 2002, 31(2): 60-61
- 109 徐志锋, 蔡长春, 严青松, 等. 强吸力钕铁硼永磁起重机. *起重运输机械*. 2004, (3): 28-30

## 攻读学位期间发表的学术论文

- 1 李慨, 岳宏, 赵海文, 刘今越, 蔡鹤皋. 基于虚拟仪器的管道焊接机器人测控系统. 仪器仪表学报. 2006, 27(6s1): 416-418 (EI: 064210187398)
- 2 Li Kai, Yue Hong, Sun Lixin, Dai Shijie, Cai Hegao. Model of Arc Noise and its Application in Welding Seam Tracking. WSEAS Transactions on Signal Processing. 2006, 2(9): 1275-1280
- 3 李慨, 岳宏, 赵海文, 蔡鹤皋. 视觉传感轮式管道焊接机器人的焊缝跟踪系统. 第 24 届中国控制会议论文集, 广州. 2005, 7: 1519-1521 (ISTP:BEL69)
- 4 李慨, 岳宏, 张毅, 蔡鹤皋. 基于结构光焊缝图像预处理的研究. 河北工业大学学报. 2007, 35(2)(已录用)

## 哈尔滨工业大学博士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的博士学位论文《基于视觉传感管道焊接机器人跟踪系统研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读博士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字：

日期： 年 月 日

## 哈尔滨工业大学博士学位论文使用授权书

《基于视觉传感管道焊接机器人跟踪系统研究》系本人在哈尔滨工业大学攻读博士学位期间在导师指导下完成的博士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

## 哈尔滨工业大学博士学位涉密论文管理

根据《哈尔滨工业大学关于国家秘密载体保密管理的规定》，毕业论文答辩必须由导师进行保密初审，外寄论文由科研处复审。涉密毕业论文，由学生按学校规定的统一程序在导师指导下填报密级和保密期限。

本学位论文属于 保密□，在 年解密后适用本授权书  
不保密□

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日



## 致 谢

本文是在导师蔡鹤皋院士的悉心指导下完成的，在此表示衷心的感谢，导师渊博的学识、严谨的治学态度、敏锐的求新精神、实事求是的科学态度、孜孜不倦的工作作风和高尚的为师品格都深深的影响和教育了我，并将永远是我学习的楷模。多年来，岳宏教授在作者的学习、工作及生活上给予的亲切关怀，将永生难忘。同时，从论文的选题、课题研究到论文撰写及修改完成都得到了岳宏教授的指导。作者的每一点进步，都凝聚了两位导师大量的心血和汗水。在此论文完成之际，谨向两位老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

作者在哈尔滨工业大学机器人研究所攻读博士学位期间，得到了赵杰教授、孙立宁教授等多方面的帮助，在此表示衷心的感谢。

在河北工业大学进行研究工作期间，也得到了众多的帮助。感谢赵海文讲师、戴士杰副教授、刘今越博士、李铁军教授等在课题方面的无私帮助。

感谢河北工业大学机器人及自动化研究所的各位老师和同学的支持和帮助。

向所有关心和支持我的领导、老师和同学表示诚挚的谢意。

最后，对天津市科技发展计划应用基础研究基金重点项目的资助表示感谢。

## 个人简历

李慨，男，汉族，1969年8月4日生，现为河北工业大学教师。

1992年河北工学院机械制造专业毕业，获学士学位。1992年至今在河北工业大学工作，2006年12月任职副教授。1996年9月至1999年3月在河北工业大学机械制造及其自动化专业读研究生，获工学硕士学位。2001年3月至今在哈尔滨工业大学机械电子工程专业在职攻读博士学位。

主要研究方向：移动机器人智能控制、机器人视觉、机电一体化应用技术等。

取得的成果：获河北省科技进步二等奖一项。