

论文题目 高温钢坯机器视觉在线检测系统关键技术研究

学科专业 光 学 工 程

学 号 201121050509

作者姓名 万聪灵

指导教师 余学才 教 授

分类号_____密级_____

UDC^{注1}_____

学 位 论 文

高温钢坯机器视觉在线检测系统关键技术研究

(题名和副题名)

万聪灵

(作者姓名)

指导教师_____余学才_____教 授_____

电子科技大学_____成 都_____

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别_____硕士_____学科专业_____光 学 工 程_____

提交论文日期_____2014.04_____论文答辩日期_____2014.05_____

学位授予单位和日期_____电子科技大学_____2014 年 6 月 27 日_____

答辩委员会主席_____

评阅人_____

注 1: 注明《国际十进分类法 UDC》的类号

A STUDY FOR KEY TECHNIQUES OF MACHINE VISION ONLINE DETECTION SYSTEM FOR HOT STEEL

A Master Thesis Submitted to

University of Electronic Science and Technology of China

Major: **Optical Engineering**

Author: **Wan Congling**

Advisor: **Prof. Yu Xuecai**

School : **School of Optoelectronic Information**

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：_____ 日期：____年__月__日

论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____ 导师签名：_____

日期：____年__月__日

摘 要

有效的检测技术不仅可以提高钢铁等冶金产品成品率，而且大大的提高企业生产率，降低企业的生产成本，增强企业竞争力。因此在轧钢生产过程中，对钢坯生产质量的控制就显得尤为重要，也是各大钢企关心的首要任务。在这样的大环境背景下，电子科技大学和首钢贵阳特殊钢有限公司共同向贵阳市科技局提出研发“高温钢坯机器视觉在线检测系统”，不仅可以完成圆钢和六角钢的轮廓参数测量，而且完成钢坯表面缺陷的判断。

本课题提出了基于线结构光双目传感器机器视觉测量原理，完成测量系统整体硬件设计，包括测量系统框架结构，高速摄像机二维固定支架，激光器二维固定平台，系统水冷和气罩的设计，同时完成测量软件设计，包括界面显示，波形显示和声控报警功能。在钢坯轮廓光带图像获取时，提出了基于滤波片和锁定成像处理的图像获取算法，能够很好滤除高温钢坯散发红光的影响。在测量系统标定时，提出线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法，不仅完成摄像机标定，而且对系统标定误差做了详细分析。针对双目摄像机视场不足的问题，提出了基于 NURBS 曲线连接算法，不仅保持钢坯轮廓局部特性，而且提高了系统测量精度。根据圆钢和六角钢轮廓检测特点，提出了基于椭圆拟合和 Hough 变换检测算法。根据高温钢坯表面散发光谱特性，提出了基于钢坯锁定区域直方图统计阈值分割算法，然后采用有条件 Sobel 算子完成钢坯表面缺陷判断。

最后，通过测量系统在现场高温，高灰尘和高抖动运行试验，进一步验证了系统稳定性和可靠性。

关键词：高温钢坯，机器视觉，双目传感器，摄像机标定，图像处理

ABSTRACT

An effective surveillance to steel products, including other metallurgical products has been demanded for improving finished product ratio and the productivity, reducing production costs, and enhancing competitiveness of enterprises. It is quite important to production quality control in the production process of rolling billet, which is the priority of major steel enterprises to concern. Under such background, UESTC and Shougang Guiyang Special Steel CL.Ltd put forward a jointly development “Hot Billet Machine Vision On-Line Detection System”, which are planed to measure contours of steel and hexagonal steel products, and survey surface defects in suferces of hot steel products. This project is finicially supported by Guiyang Science And Technology Berau.

The measuring principle of Two-Senor machine vision based on line-structured light has been performed in this paper. We have finished the whole framework of the machine vision based measurement system, including two-dimensional fixed platform of high-speed camera, two-dimensional line lasers, water-coolling facilities, and gas-hood method. Also, we have developed the software design, including interface display, data display and voice alarm function. To acquire line-light outline of the billets a lock-in imaging technique is applied, which has good performance to eliminate effects of hot steel on the imaging. A calibration method for billet outline dimension measurement based on linear-structure light with two-senor is conducted, and calibration error has been analysed in detail. An algorithm based on NURBS curve is proposed to solve problems related to two-camara. This algorithm is capable of mataining local properties of the billet outline, and improves the measurement precision. An algorithm of ellipse fitting for round steel products, and Hough transform algorithm to hexagonal steel products are performed. A significant segmentation algorithm based on histogram of a billet to distinguish surface defects is proposed and performed, which uses a conditional Soble oporator .

The surveilling system works stably, undergoing high temperature, dense dusts, and strong vibrations.

Keywords: Hot steel, machine vision, Two-Senor, camera calibration, image processing

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 国外研究及应用技术现状	2
1.2.1 HotEye 裂纹检测系统	2
1.2.2 SIROLL Orbis 测距仪系统	3
1.3 课题研究意义及其论文结构安排	4
1.3.1 钢坯轮廓尺度和表面缺陷测量参数	4
1.3.2 课题研究内容及论文结构安排	6
第二章 高温钢坯机器视觉在线检测系统结构和原理	7
2.1 高温钢坯在线检测系统结构设计	7
2.2 线结构光测量系统的原理和数学模型	10
2.3 激光锁定成像技术消除背景光	11
2.3.1 激光锁定成像技术原理	12
2.3.2 锁定成像处理钢坯光带提取效果	13
2.4 本章小结	14
第三章 双目摄像机轮廓标定技术研究	16
3.1 摄像机模型	16
3.1.1 坐标系	16
3.1.2 针孔成像模型	18
3.1.3 非线性畸变成像模型	18
3.2 单目摄像机标定方法	20
3.2.1 Tsai 两步法	20
3.3 线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法	21
3.3.1 双目摄像机标定基础	22
3.3.2 双目摄像机标定	22
3.3.3 系统标定误差校正	24
3.3.4 系统标定实验及其结果	27
3.4 本章小结	29
第四章 钢坯表面轮廓和缺陷图像处理算法及其参数测量研究	30
4.1 钢坯轮廓光带图像预处理	30

4.1.1 图像均值滤波	30
4.1.2 OTSU (大津法)	31
4.2 轮廓图像处理算法及其测量参数研究	32
4.2.1 钢坯单像素轮廓图像提取	33
4.2.1.1 Zhang 快速并行细化算法	33
4.2.1.2 断线-曲线连接	35
4.2.2 圆钢轮廓椭圆拟合算法	36
4.2.3 六角钢轮廓 Hough 直线检测算法	39
4.3 轮廓表面缺陷判断图像处理算法研究	41
4.3.1 钢坯表面缺陷判断基础	42
4.3.2 钢坯图像区域提取	43
4.3.3 钢坯区域图像特征提取	44
4.3.4 钢坯表面缺陷决策判断	47
4.4 本章小结	48
第五章 系统现场测量结果及其分析	49
5.1 测量系统框架结构及其硬件	49
5.2 软件系统介绍	50
5.2.1 软件需求分析	50
5.2.2 软件框架设计	51
5.2.3 软件流程图设计	52
5.2.4 软件操作界面介绍	53
5.2.5 软件操作注意事项	55
5.3 系统测量实验及其结果	55
5.3.1 实验室环境下测量数据	56
5.3.2 贵钢现场测量数据	58
5.4 本章小结	59
第六章 全文总结与展望	60
6.1 全文总结	60
6.2 后续工作展望	60
致 谢	62
参考文献	63
攻读硕士学位期间取得的成果	67

第一章 绪 论

1.1 引言

钢铁产品是生产生活中不可或缺的原材料，在各行各业得到了广泛的使用，如汽车行业，造船业等。随着我国经济的不断发展，对于钢铁的需求越来越大，生产高质量的产品已经成为钢铁企业普遍的共识。近些年来，除了钢铁生产工艺的不断提高以外，如 COREX 熔融还原法相比于直接还原，它可以使用低含量的铁矿石为原料，从而提高资源的使用率。另外钢铁生产过程监控水平的不断提高，对于钢铁制造技术水平的不断发展，发挥了不可磨灭的作用。

钢铁等冶金产品成品率很大程度上依赖于有效的检测技术，有效的检测手段可以采取及时措施，避免问题流入下一道工序，或不合格产品流入市场，造成批量损失。对于钢铁企业来说，冶炼技术能够决定钢锭的各种物理和化学特性，而轧钢技术能够决定一个企业的生存。轧钢生产工艺过程提高也需要大量可控检测仪器仪表，如在加热炉温度检测系统，导辊速度控制系统等，而对轧钢技术的监控，最终决定钢铁企业钢坯生产的质量，因此对轧钢生产过程的监控显得尤为重要。轧钢生产过程是高温、高热和高湿度的环境，对于开发在线检测技术拥有一定难度。目前为止，已有一些适应高温、高热在线检测技术，这些技术主要基于电磁、超声和图像等方面的传感技术。基于电磁传感的技术主要用于高炉中钢渣的监测、超声检测技术用于钢水下渣的监测等，但这些技术只能用于高温金属熔体的初略监测，不能用钢坯表面缺陷和轮廓尺寸检测。

随着计算机技术的发展，上个世纪 70 年代 CCD 和 CMOS 传感器技术的先后出现，由于 CCD 和 CMOS 传感器的非接触式、响应速度快，环境承受能力强和抗电磁干扰等特性^[1-2]，从而可以在很大程度上适应轧钢生产恶劣环境。在近 20 年来，随着 CMOS 生产工艺的不断提高，在像素的大小和成像速度上都相对于 CCD 有极大的提高，特别是机器视觉理论和技术的不断革新，基于机器视觉非接触式技术在金属工件检测应用中得到越多的重视^[3]。

基于机器视觉的工业测量技术，早在上个世纪 60 年代^[4-5]，在欧美等发达国家已经开始相关研究，并且提出了许多测量技术和原理，但这些理论也主要停留在实验室阶段，并没有在工业生产中广泛使用。由于激光器具有光束质量好、体积小和适用性强等特点，利用激光器做线结构光源的测量方法获得越来越广泛的关注。最早从上个世纪 70 年代开始研究基于线结构光机器视觉检测技术^[6]，随着 Tsai^[7], Zhang^[8]等学者对于摄像机成像理论和标定的研究成果发表，使得基于三角

测量方法的机器视觉测量技术得到了广泛的应用，是目前工业生产在线测量领域使用最为广泛的一种机器视觉检测方法。



图 1-1 HotEye 系统

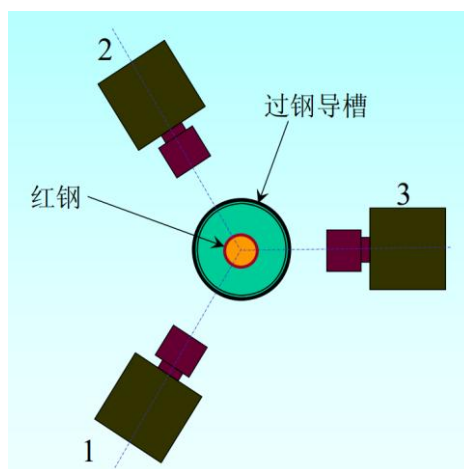


图 1-2 摄像机分布示意图

1.2 国外研究及应用技术现状

在上个世纪 80 年代左右，欧美等发达国家钢铁企业已经开始从事基于机器视觉在线检测系统的研究，先后投入巨资发展基于计算机机器视觉在线检测系统设备。目前国际市场上从事于机器视觉的工业检测著名公司主要有美国 OG Technologies 和德国 Siemens VAI Metals Technologies 公司，这两家公司在我国热轧钢在线检测设备占有率 80% 以上。

1.2.1 HotEye 裂纹检测系统

美国 OG Technologies 公司从上个世纪 90 年代中期开始推出基于机器视觉裂纹在线检测设备，如图 1-1 所示为 HotEye 检测系统^[2]，该系统内部主要采用三像机或四像机全视图的方位覆盖，如图 1-2 所示。这种图像获取方式能够达到无死角，无漏点检测。

HotEye 检测系统采用主动式表面缺陷检测原理，通过向钢坯表面投射强光，利用可见光波波长短，衍射小的特点，对于那些缺陷凹凸曲率变换较大处，就能引起光强相对于周围明显的变化，利用图像灰度变化结合图像处理算法从而完成表面缺陷检测，这种检测方式检测精度能够达到微米级 0.020mm，而且检测无方向性，能够检测到在热轧条钢上所有类型的裂纹。另外由于采用垂直直视模式，HotEye 系统只能做裂纹检测，无法对钢坯轮廓进行测量，功能单一相对于动辄数百万美元的价格来说有点昂贵。

1.2.2 SIROLL Orbis 测距仪系统

德国 Siemens VAI Metals Technologies 公司主要开发热轧棒线材尺寸和形状在线轮廓检测设备，该公司从上个世纪 90 年代起就在我国大力推广在线轮廓检测设备，现已在我国热轧钢棒材生产线上占有率达到 80% 以上。SIROLL Orbis 为其主打测径仪系统，该系统主要对圆钢的断面轮廓进行测量，最高测量速度达到了 100m/s 能够满足大多数棒材高线生产要求，系统外观如图 1-3 所示。



图 1-3 SIROLL Orbis 测距仪系统

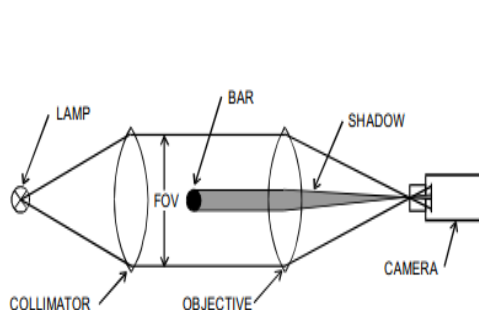


图 1-4 系统原理示意图

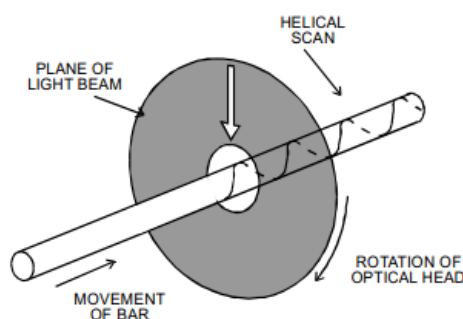


图 1-5 系统轮廓扫描示意图

SIROLL Orbis 测径仪采用的原理为 CCD 接收器-LED 背景光源-投影放大法，如图 1-4 所示。光学系统使用 LED 灯泡作为光源，通过组合透镜产生平行光照射到热轧钢坯上，并经过另外一组透镜聚焦在 CCD 摄像机上，利用 CAT5 网线把数据传输到计算机，再计算出阴影宽度，即得到钢坯某一个轮廓尺寸参数。在整个系统运行过程，光学系统相对于钢坯在不断旋转，从而获得钢坯的完整轮廓，如图 1-5 所示。虽然该系统得到了广泛的应用，由其测量原理可知，只适用于圆钢的检测，对于六角钢等异形钢，并不能完整成像。另外整个光学系统在运行过程中是高速旋转的，对系统内部环境要求非常的洁净，对于轧钢这种生产过程高温、

高粉尘和高湿度环境来说有点苛刻，因此在连续运行一段时间后，经常出现无法旋转的问题，从而造成经济损失。

目前，相较于发达国家，我国在非接触式在线轮廓检测设备起步较晚，在上个世纪 80 年代末才开始类似研究，也取得了一定的科研成果，但是至今并没有类似于 HotEye 和 SIROLL Orbis 的成套设备出现，相关的研究也停留在高校和科研院所里头。在上个世纪 90 年代初，宝钢集团与中国科学院上海技术物理所作出了探索，共同合作研发了一套 GCJ-I 光电测径仪^[9]，由于测量系统运行缓慢，特别是对系统抖动敏感，最终没有得到推广，但是也给我们提供不少宝贵的企业和高校、科研院所合作经验。

1.3 课题研究意义及其论文结构安排

在工业和信息化部有关印发《钢铁工业“十二五”发展规划》对我国未来钢铁行业进一步规划和调整^[10]，不仅要把我国建设成钢铁强国，而且还有加大钢铁配套产业建设投入，产生一批具有领先的国外同类先进技术和产品。在这样的大环境背景下，电子科技大学和首钢贵阳特殊钢有限公司（简称“贵钢”）向贵阳市科技局提出共同研发“高温钢坯机器视觉在线检测系统”用以替代国外同类产品，满足圆钢和六角钢的日常生产要求，提高自有率。

1.3.1 钢坯轮廓尺度和表面缺陷测量参数

轧钢指的是在有序排列的轧机之间，通过压力加工改变钢锭的形状。每一条棒材生产线，由多个不同轧机组成，而每一个轧机，又由多个轧辊组成，两个轧辊构成的形状成为孔型。由于在轧钢生产过程中，轧辊是不断旋转，而且两个轧辊之间是有一定间隙的，因此钢坯的轮廓尺度规格是有一定要求的，本文以圆钢和六角钢为例。

在圆钢的轧制过程中为了保证圆钢的椭圆度一般采用椭圆孔型设计^[11,13]，如图 1-6 所示。圆钢孔型是由两个不同半径 R_1 和 R_2 组成的椭圆孔径，双半椭圆之间的孔隙称为辊缝。在轧钢生产过程中轧辊是高速旋转，依靠压力改变钢坯的形状，因此在 R_1 和 R_2 所属圆部分产生的压力不一样，磨损系数不一样，如果磨损偏大或者压力偏大，都会造成在轧钢的不均匀变形，因此在轧钢过程中要对圆钢的 A 、 B 、 C 和 D 轮廓参数进行实时测量。

相比于圆钢的轧制过程，六角钢采用水平轧辊方式，六角钢孔型设计^[12,13]如图 1-7 所示。在高速轧制过程中，孔型的三对对边的压力不同、磨耗系数也不一样，同样如果孔型磨耗偏大，也会造成不均匀变形，因此在轧钢过程必须对 A 、 B 和 C

轮廓参数进行实时检测。

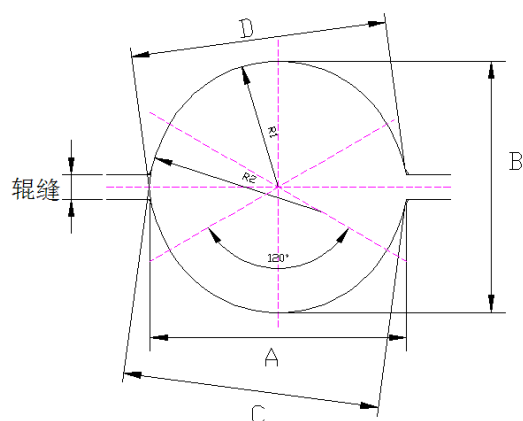


图 1-6 圆钢孔型设计

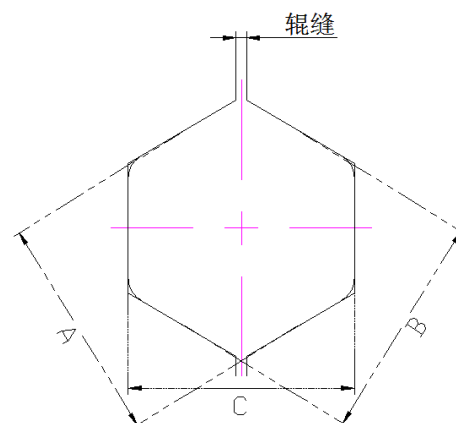


图 1-7 六角钢孔型设计

在轧钢生产过程中除了轮廓尺度的控制以外，另一个重要的质量参数就是表面缺陷。目前，在人工检测过程中，轮廓尺度部分参数可以做到热轧钢状态下检测，而表面缺陷只能在冷态下人工抽检。表面缺陷一旦出现，容易造成批量的质量问题，特别是那些细小的缺陷容易间断性出现，如凹坑、裂缝，如图 1-8 所示。在轧钢生产过程中，由于钢锭内部质量、连轧工艺和生产设备等不可控因素影响，从而造成钢坯出现裂纹、划痕、结块、翻皮等表面质量问题。这些表面质量问题，不仅对生产成品原有的物理机械性能造成影响，特别是在用户的后期加工过程中，容易造成最终产品的内部质量问题，如某次贵钢粗轧区第 5 轧机出现爆棍，这是由于生产轧辊的钢坯内部缺陷累加到成品轧辊上造成的，如图 1-9 所示。

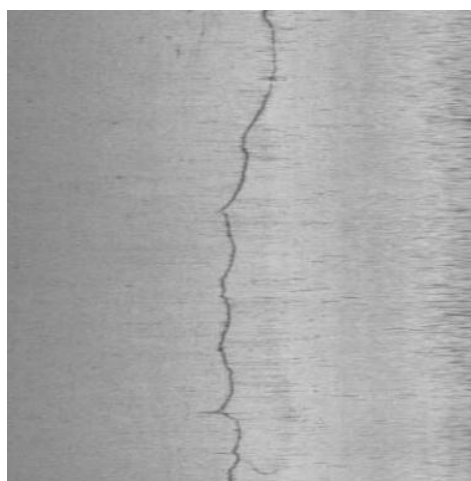


图 1-8 六角中空钢表面缺陷



图 1-9 轧机爆棍示意图

1.3.2 课题研究内容及论文结构安排

本文综合国内外现有研究技术现状，在实验室已有测量方案的基础上，研发了非接触式的“高温钢坯机器视觉在线检测系统”，该系统能够完成对圆钢和六角钢的轮廓尺度测量和表面缺陷判断，并能够实时把数据反馈给生产工人，对棒材生产线设备做出及时调整。本文将从框架设计，硬件设计到软件设计实现测量系统的功能，并通过大量的实验发现并解决系统运行过程中，遇到的各种硬件、软件、程序结构和图像算法问题，如背景光和钢坯本身散发红光的消除、双目摄像机标定问题，轮廓图像断线连接和钢坯铁销层的提取等等。通过软件功能需求的分析，在基于 Visual C++ 6.0 平台上完成了系统软件的开发和设计，包括系统界面的设计、多线程并发调试、图像算法的实现、数据测量和显示等，另外完成了报警功能设计，当轮廓测量参数和表面缺陷长期超标之后，通过声控报警提示一线生产操作工人。根据课题主要研究工作，论文结构如下：

第一章：绪论。该部分从探讨在线检测设备在现代钢铁等冶金行业意义地位出发，并对国内外现有的一些在线检测设备进行了综述，分析各自的优缺点为本文研究提供借鉴意义，最后总结了本文主要研究的对象和内容。

第二章：高温钢坯机器视觉在线检测系统结构和原理。针对单目测量系统视场不足问题，提出了双目对称测量系统结构设计，并对系统测量原理做了阐述，最后介绍锁定成像技术在提取光带图像，消除背景光的原理和应用。

第三章：双目摄像机轮廓标定技术研究。该部分从摄像机成像模型出发，结合国内外现有的像机标定技术方法，提出了具有本文特色的线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法解决钢坯二维轮廓提取问题，并对多像机标定中误差做出了理论分析，最后给出实验结果。

第四章：钢坯表面轮廓和缺陷图像处理算法及其参数测量研究。介绍轮廓图像处理算法及其测量参数研究，提出了钢坯轮廓图像预处理基本算法，针对圆钢和六角钢轧制孔型设计和轧制特点，提出了基于椭圆拟合和直线检测的轮廓检测算法，并给出相应的实验结果验证。针对检测钢坯的类型和表面铁销形成特点，提出了具有本文特色的基于 Sobel 算子的表面缺陷判断，并给详细算法流程及其实验结果。

第五章：系统现场测量结果及其分析。该部分对系统现场组装整体框架进行了介绍，并对软件的设计过程做了简要说明，通过在不同环境下测量的大量实验数据，对测量系统的准确性和稳定性进行了分析和验证。

第六章：全文总结与展望。对本文所做的研究工作做一个总结，并对系统的未来工作进行展望。

第二章 高温钢坯机器视觉在线检测系统结构和原理

无论 HotEye 系统, 还是 SIROLL Orbis 系统对表面缺陷判断和轮廓尺度测量, 在整个系统设计的方案上都只对其中的一个测量范畴做考虑, 造成测量系统结构浪费和企业成本增加。如 HotEye 系统采用三像机垂直视图结构, 虽然在裂纹判断上做到无漏点, 但在现有的技术背景下, 采用这种结构原理是无法获得钢坯轮廓测量, 同理 SIROLL Orbis 系统采用的是背景投影法, 并不能获得完整的钢坯灰度图像。鉴于上述系统结构设计经验, 本文提出了双目对称测量结构设计, 采用线结构光测量方法^[14]作为钢坯轮廓测量原理, 同时也可以采用被动光视觉检测方法^[15-16, 56]作为裂纹判断的基本原理。如图 2-1 所示为检测系统的整体设计方案, 硬件部分主要完成检测系统的框架结构和测量原理的设计, 软件部分主要完成数据整合和软件功能设计。

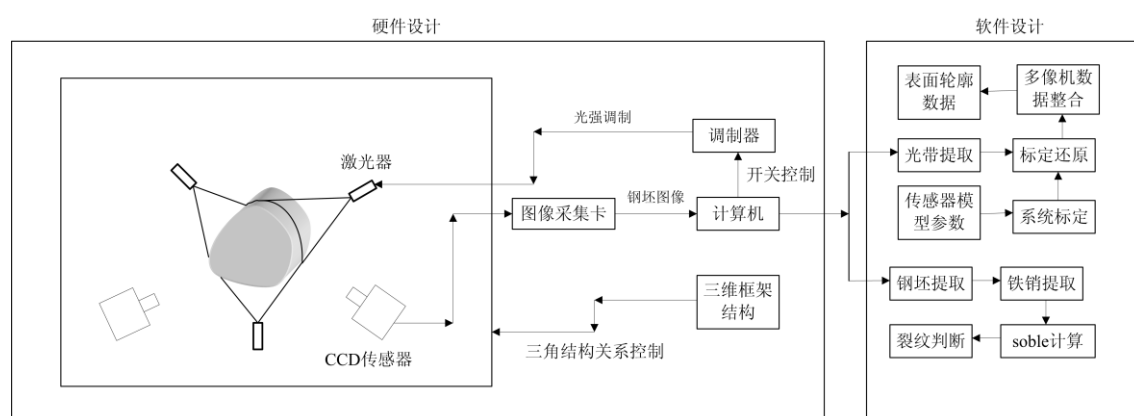


图 2-1 高温钢坯机器视觉在线检测系统测量方案示意图

2.1 高温钢坯在线检测系统结构设计

根据线结构光测量系统的基本要求, 结合本文高温钢坯在线检测系统的整体设计方案, 测量系统采用如图 2-2 所示结构设计图, 其中包括两个轴对称的 CMOS 摄像机及其二维的移位固定支架、三个共面激光器及其二维调整平台; 三只线结构激光器采用 120° 夹角分布, 每一只离钢坯中心面等距, 这样保证投射的激光带等均匀变化, 调节二维平台使激光面共面投射到钢坯表面, 在钢坯表面形成一个环形激光断面轮廓光带, 再利用摄像机获取光带图像, 传送到计算机中计算钢坯轮廓信息; 同理在获取裂纹图像时, 计算机发出指令关闭激光器控制器, 摄像机获取一幅钢坯表面灰度图像, 传送到计算机中计算判断钢坯表面是否存在裂纹。

由于钢坯表面曲率特征的分布不规则, 特别是当轧机出现问题, 轧钢不均匀

变形造成凸起或者凹陷的情况，所以采用两个摄像机在对称分布的设计方案，可以减少测量盲区，获得完整钢坯表面灰度图，保障裂纹判断的可信性；同时又可以构成一个双目视觉测量系统，将双目视觉测量的方法应用到标定过程中，提高标定的准确性和可操作性，获得钢坯完整三维轮廓信息。

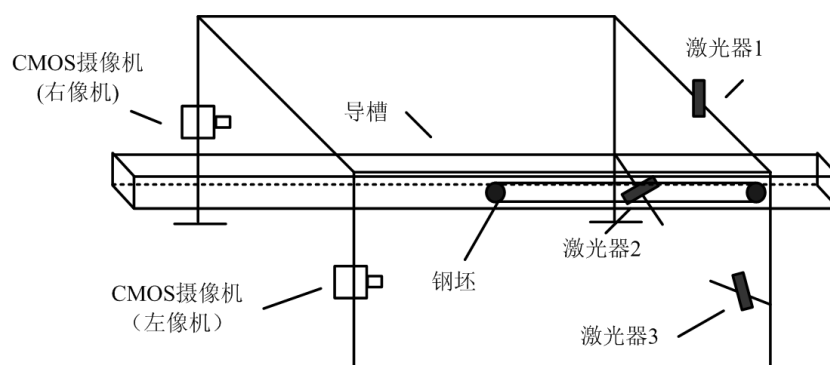


图 2-2 高温钢坯机器视觉在线检测系统结构设计图

由于轧钢棒材生产线的高温、高湿度和高粉尘的特性，不得不考虑到测量系统整体结构的防尘、耐高温、稳定和牢靠性。在框架的设计过程中，由于铝合金的重量轻、强度高、导热性好而且易于加工等特点，采用铝合金作为框架设计基本材料，系统框架结构图如图 2-3 所示，三只激光器通过铝合金前面板实现共面，摄像机通过二维平台固定在支架上。

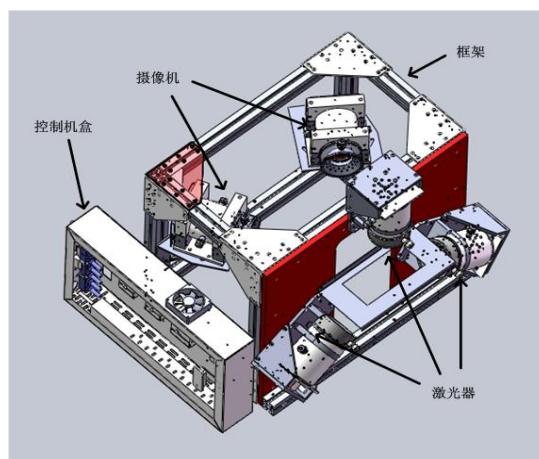


图 2-3 系统框架结构示意图

在轧钢生产过程中钢坯的表面温度一般保持在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间，由于钢坯高速运动，导致表面铁销脱落漂浮，因此测量系统长期处在这种高温、高粉尘环境下，摄像机和激光器肯定会超过正常工作温度和环境。在系统结构设计时，必须考虑摄像机和激光器的制冷和隔尘防护，如图 2-4 所示为摄像机和激光器的水冷和隔尘

装置示意图。水冷套通过水管串行连接在一起，纯净水在里头循环流动降温；压缩空气通过气管并行连接在气罩上，达到防尘效果。

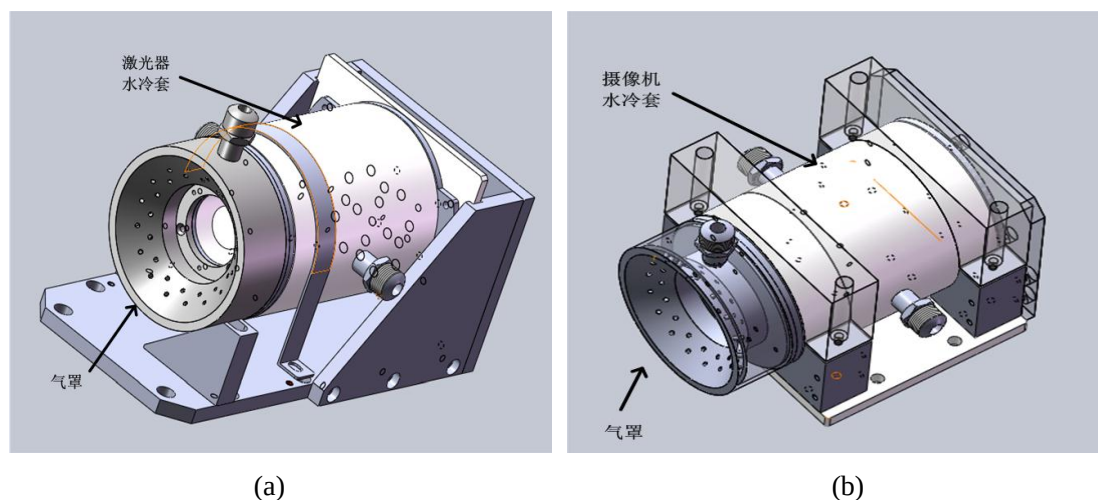


图 2-4 摄像机和激光器水冷和隔尘装置示意图

(a) 激光器水冷套；(b) 摄像机水冷套

在测量系统搬运过程中，特别是轧钢生产中整个测量系统都是高度抖动的，采用一般的光学紧密固定仪器几乎是不可能满足系统的测量要求，因此摄像机的二维固定支架和激光器的二维调整平台均采用加固、防抖设计结构，如图 2-5 所示为摄像机的二维固定支架和激光器二维调整平台。旋转平台的圆孔为放置摄像机水冷套的旋转轴，弧形环为锁死固定装置，当摄像机调整至适当高度之后锁死固定架的位置，然后调节旋转摄像机视角并锁死；激光器通过移位平台调整的到合适位置后，再调节摆弧臂使三只激光器共面并锁死。

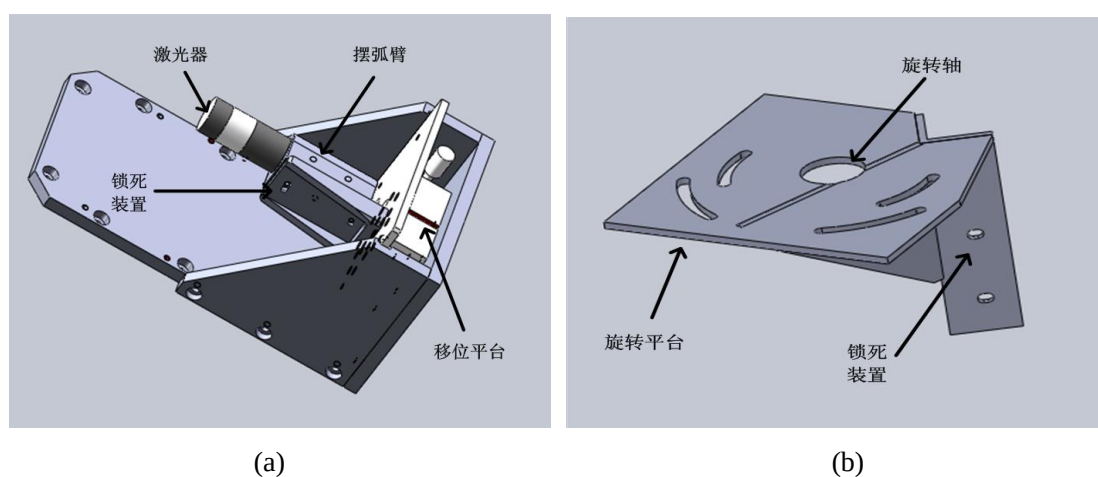


图 2-5 摄像机二维固定平台和激光器二维调整平台示意图

(a) 激光器二维调整平台；(b) 摄像机二维固定平台

2.2 线结构光测量系统的原理和数学模型

线结构光测量法^[4-5,17]，俗称光切法，是一种三角测量方法，依据被测物、线结构光和 CCD 之间的空间位置关系获取轮廓断面图像，该测量方法拥有非接触式，高精度，抗电磁干扰，高速和技术成熟的基本特征。其原理如图 2-6，它采用线结构光作为光源，当线结构光垂直照射到被测物表面时，会在被测物体上形成断面轮廓光带，CCD 传感器再从另外一个角度获取被测物体光带图像，从而获得被测物体轮廓的三维信息。

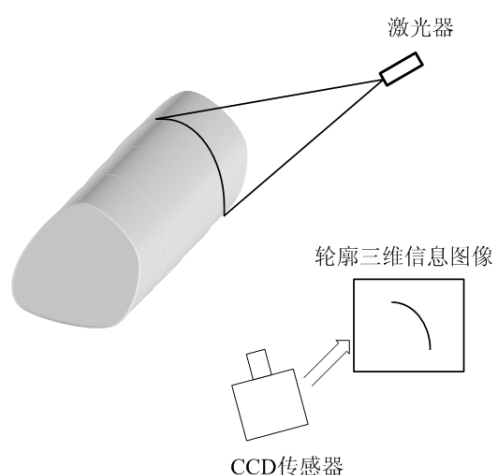


图 2-6 线结构光测量系统结构示意图

线结构光测量方法主要以线结构激光器和 CCD 共同作为图像传感测量单元，其系统测量过程主要分为以下三个步骤^[4]：

第一步：利用三角测量原理，事先获得特征点在 CCD 传感器图像成像的图像，即图像坐标系的位置关系，再利用特征点在世界坐标系中的位置关系，求出两个坐标系统的映射关系式；

第二步：根据系统测量需求投射可控线结构光到物体表面形成轮廓特征线，并由 CCD 摄像机拍摄图像；

第三步：利用坐标系统映射关系式，由激光光带图像坐标系统反推世界坐标系统的坐标图像，从而获得被测物的三维轮廓信息。

如图 2-7 所示为光切法光路原理图。 β 为 CCD 阵列与摄像机光轴的夹角， O 为两个光轴相交点， γ 为摄像机光轴 PO 与投影光轴 QO 的夹角， H 为被测物上某一点， I 为成像透镜系统， N 为 H 在 CCD 上成像像素点，其中 N 点相对于中心像素 M 的偏移量为 $\Delta = M - N$ 。

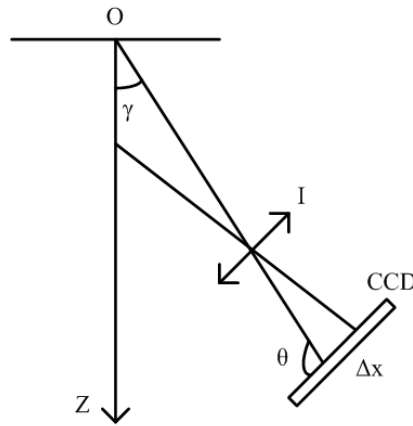


图 2-7 光切法光路原理图

在测量过程中，为了使线结构光带上的物点都能在 CCD 阵列成像而不产生离焦现象， γ 和 β 必须满足 *Scheimpflug* 条件，即：

$$\tan \gamma = \theta \tan \beta \quad (2-1)$$

式中， θ 为横向放大率。

由光路原理图进一步推导，可得面行高度 OH 几何关系式：

$$OH = \frac{(OI - f) \cdot \Delta \sin \beta}{f \cdot \sin \gamma + \Delta \sin \beta \cdot \cos \gamma} \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 可知， OH 与 Δ 成非线性关系， f 为摄像机的等效焦距。

在实际测量系统中，当激光器投射的激光平面与被测物体相交时，将会在被测物表面形成断面轮廓亮带，再通过摄像机便可获取被测物断面轮廓信息。其中，摄像机标定技术指的是通过断面轮廓图像二维像点 (u, v) 坐标还原重构其对应三维物点 (x, y, z) 坐标这个过程。如何实现重构，也是线结构测量系统的基本任务，即怎样获得如下映射关系式：

$$(x, y, z) = f(u, v) \quad (2-3)$$

2.3 激光锁定成像技术消除背景光

在轧钢生产过程中，钢坯表面温度达到 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ ，表面散发的光谱也主要集中在近红外段，特别是当检测轮廓区域出现亮裂纹时，都会影响亮光带成像质量。虽然加入滤波片可以滤除一部分钢坯表面光谱，但是并不能从根本上解决问题。本文采用滤波片加锁定成像技术提取光带图像，就能很好的滤除外部环境的光源的干扰。激光锁定成像的作用是从强背景光中获取目标真实图像，由于激光锁定鉴相能够在信噪比远小于 1 的情况下提取弱图像信号，因此在光学滤波之前可以

再加光学衰减片。这样，即使非常强大的背景光源，经过光学衰减和光学滤波后进入光探测器阵列后都成了小信号，保证了 CCD 光探测器不会饱和。但并不影响锁定鉴相的效果，仍然能够从信噪比远小于 1 的情况下把激光照明区域的图像提取出来。

2.3.1 激光锁定成像技术原理

为了解决成像过程中环境光干扰因素的影响，采用了激光锁定成像的方法来滤除钢坯散发的红光等背景光源^[18-20]。它的主要原理是通过预先设定的 TTL 电压脉冲信号来调制激光器的发光，同时同步控制 CCD 采集光带图像信息，将脉冲调制周期内前半周期内获取的 N 图像，与后半周期内获取的等帧图像累加相减，便得到一幅去除背景光的亮光带图像，这个过程称之为激光锁定成像。这个图像处理过程类似于锁相环中的鉴相原理，鉴相处理流程如图 2-8 所示。

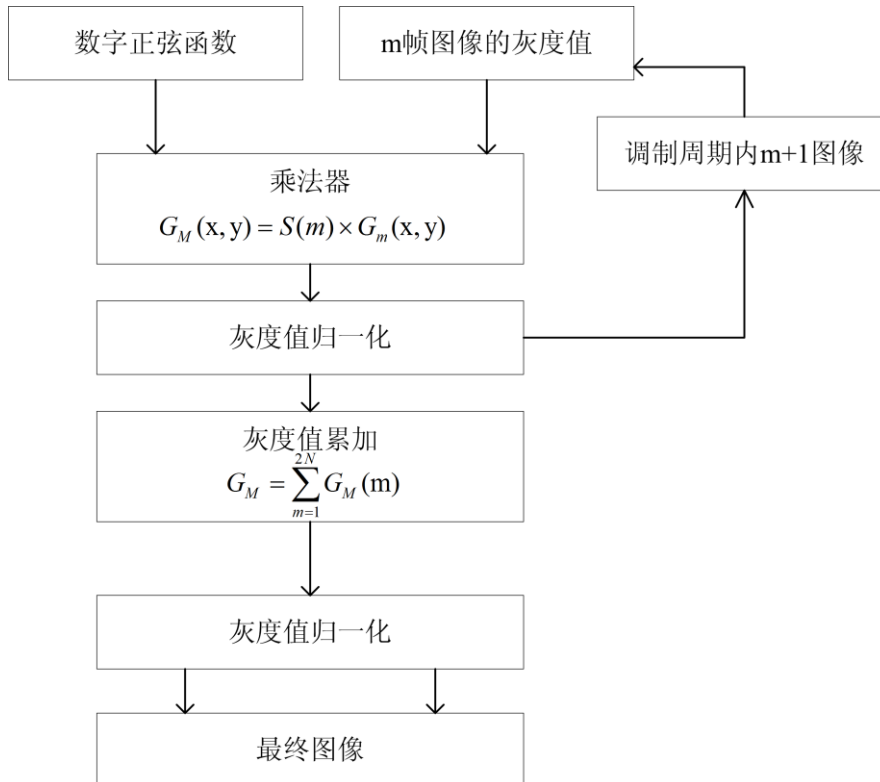


图 2-8 鉴相处理流程图

假设经过数字 TTL 信号调制后，CCD 在一个调制信号周期内共获取 $2N$ 帧图像，其中，将第 m 帧图像在点 (x, y) 处的灰度值 $G(m)$ 表示为：

$$G(m) = G_B(m) + G_g(m) \quad (2-4)$$

式中， $G_B(m)$ 是强背景光源散射和 CCD 内部暗电流等噪声信号的叠加图像灰

度值, $G_g(m)$ 为激光交合面钢坯轮廓散射灰度图像信息, 其中采用正弦调制电压, 经调制后目标区域钢坯断面图像灰度 $G_g(m)$ 表示函数为:

$$G_g(m) = G_{g0}(1 + \xi \sin(\omega \Delta t m + \varphi)) \quad (2-5)$$

G_{g0} 额定电压驱动下激光器照射目标区域灰度值, 其值可以当作常量处理; φ 为调制信号初试相位, 也是常数; ξ 为调制度; ω 为调制角频率; Δt 表示获取相邻两帧图像的时间差。

经乘法处理后, 可以进一步得到图像灰度值函数 $G_M(m)$:

$$\begin{aligned} G_M(m) &= (G_B(m) + G_{g0}(1 + \xi \sin(\omega m \Delta t + \varphi))) \times \sin(\omega m \Delta t) \\ &= (G_B(m) + G_{g0}) \sin(\omega m \Delta t) + \frac{1}{2} G_{g0} \xi \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \xi G_{g0} \cos(2\omega m \Delta t + \varphi) \end{aligned} \quad (2-6)$$

在一个调制周期内所获取的灰度函数 $G_M(m)$ 是满变化, 而且是离散信号, 因此进一步采用离散积分处理, 即求和运算可得:

$$G_M = \sum_{m=1}^N G_M(m) = \frac{1}{2} G_{g0} N \xi \cos \varphi \quad (2-7)$$

由上式可知, 将一个调制周期内的图像灰度信息处理后并进行累加, 得到的光带灰度图像信息与背景灰度图像信息 $G_B(m)$ 是无关的, 仅与调制信号相位相关, 计算得到的输出灰度图像信息只包含目标图像, 这个过程和信号处理中锁相环鉴相原理的模型相似。经锁定成像处理后, 能够将感兴趣的激光光带图像从复杂的背景光中分离出来, 消除外界背景的干扰。这样, 我们就能从复杂的钢坯背景信息中提取出激光断面轮廓二维图像, 为得到完整的高质量钢坯轮廓二维图像做好准备。

2.3.2 锁定成像处理钢坯光带提取效果

在获取钢坯二维轮廓图像时, 主要的目标是获取激光钢坯断面轮廓图像信息, 同时抑制外部背景光的干扰。由于采用的是单色激光光源, 单色性较好, 通过光学滤波片能够滤除一些杂散的环境光, 但是仍然会受到外部环境的干扰。虽然摄像机的曝光时间和增益系数是可调节的, 但是这些参数的调节对目标信息和干扰信息的影响也是同步的, 另外考虑到裂纹判断的有效性, 也不能随意的调节曝光时间, 特别是增大增益系数, 这样会造成传感器对内部暗电流高斯噪声的放大, 导致钢坯成像质量下降。

根据上一节介绍的激光锁定成像原理, 通过 TTL 调制电压, 调制激光器强度, 同时调节摄像机同步采集信息, 这样, 摄像机采集到的钢坯图像就能很好的抑制背景光的干扰。考虑到测量系统是动态、高速测量的要求, 为了能快速的采集到

图像，因此在一个调制周期内采集两帧图像，如图 2-9 表示的是摄像机拍摄到的原始钢坯图像及其锁定成像处理效果图。其中存在一条贯穿图像的亮带的存在，这是由钢坯尖锐反射造成的，只要激光投射到钢坯表面，该亮带就会始终纵向贯穿图像，因此在锁定图像处理的同时，以一定的像素宽度进行纵向扫描，满足阈值条件后计算平均灰度值，凡是在平均灰度以下置零，从而可以完美的从图像中去除尖锐反射亮带。图 2-9(a)为右摄像机锁定成像处理对比效果图；2-9(b)为左摄像机锁定成像处理对比效果图，其中包括了亮带的滤除算法在内效果。

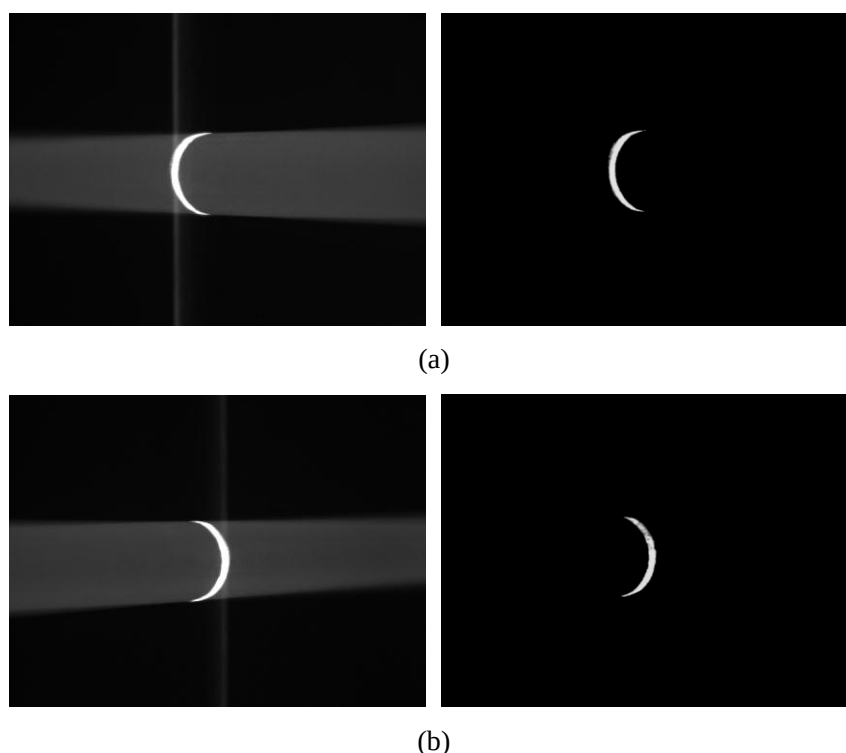


图 2-9 钢坯原始图像及其锁定成像处理效果图

(a) 右像机锁定成像效果图；(b)左像机锁定成像效果图

如上述实验所示，经过锁定成像处理之后，能够从摄像机获取复杂的背景光图像中有效的提取出激光钢坯断面轮廓，这样就能让测量系统即使在一个极其复杂的背景光环境下，仍然能够很好的提取钢坯断面轮廓图像。锁定成像技术的应用能够很好的解决钢坯本身散发红光的影响，保障从复杂的背景光环境中很好的提取出高质量的钢坯断面轮廓图像。它的应用是测量系统能够稳定运行的最基本保障。

2.4 本章小结

本章主要以高温钢坯在线检测系统结构设计出发，认真总结和借鉴国外现有

轮廓和裂纹在线检测设备设计经验，提出了具有本文特色双目对称测量系统结构设计，同时兼顾了裂纹判断可行性，阐述了测量系统采取的原理，为下一章双目摄像机轮廓标定技术研究提出了理论指导。最后从原理上介绍了激光锁定成像技术在高温钢坯断面轮廓提取的应用，并给出实验分析结果。

第三章 双目摄像机轮廓标定技术研究

摄像机标定也是线结构测量系统必须进行的步骤，相较于单目线结构光测量系统，在三维轮廓机器视觉测量中，一般需要两个及其以上的摄像机，所以在多传感器线结构光测量系统中，除了对摄像机进行参数标定外，还需要对系统标定误差进行校正。

3.1 摄像机模型

在机器视觉测量系统中，空间某一物点与其在摄像机对应像素点的位置关系，是由摄像机成像模型唯一确定。根据不同的标定原理发展和建立多个摄像机模型，一般分为线性和非线性两种模型^[21-22]。针孔模型是研究最早，最简单，最理想的线性成像模型；当测量精度较高，特别是大工件的测量系统中，都采用广角镜头，因此简单的针孔模型不能满足分析要求了，必须要建立非线性畸变模型。

3.1.1 坐标系

为了更好的描述摄像机模型，需要引入三个坐标系^[22]，如图 3-1 所示为三个坐标系的对应位置关系， P 为被测物轮廓上某一物点，世界坐标为 (x_w, y_w, z_w) ； N 为 P 点摄像机光路几何成像对应点，摄像机坐标为 (x_c, y_c, z_c) 。

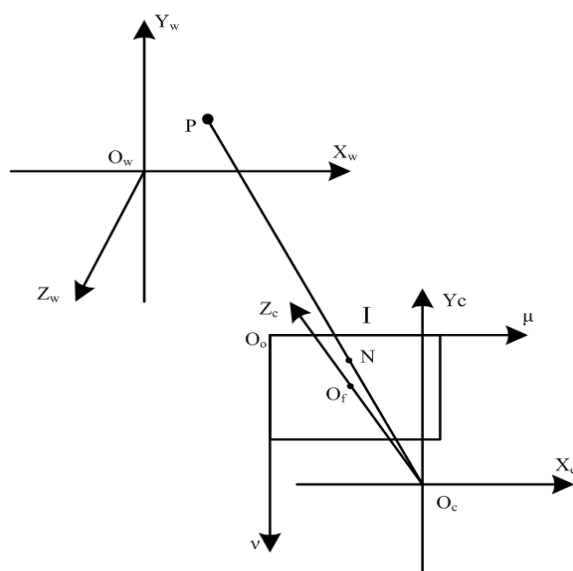


图 3-1 三个坐标系位置关系

世界坐标系是在测量空间中选取的一个标准坐标系，用于表示被测物理的空间位置关系，可以根据表示和计算方便的原则自由选取。如图 3-1 所示，世界坐标

系的位置可以任意指定，由原点 O_w 和 (X_w, Y_w, Z_w) 坐标轴组成。

$O_c - X_c Y_c Z_c$ 称为摄像机坐标系^[22]， O_c 为镜头光心， $O_c X_c Y_c$ 平行于摄像机 CCD 传感器成像平面， Z_c 轴垂直于成像平面，且重合于光轴行进方向与图像平面相交于点 (u_o, v_o) ，即图像的中心点坐标，如图 3-1 所示。

由图可知，对世界坐标系物点 P 与对应 CCD 成像点 N 的齐次变换关系式如下：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (3-1)$$

其中 R 是 3×3 正交旋转矩阵， T 是 3×1 平移矩阵，进一步将式(3-1)变换：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

图像坐标系是建立在图像平面的直角坐标系，如图 3-1 所示以图像左上角为原点 O_o 建立的 $O_o - uv$ 为图像坐标系，根据不同的测量要求一般以像素点或像点物理长度为单位，在这里分别以 (u, v) 和 (x, y) 来表示。每一个摄像机厂商生产之后，CCD 单位像素的物理尺寸 d_x 和 d_y 也就确定，其比值 d_x/d_y 也是极其重要的描述参数，则有两个坐标系变换关系式：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & \lambda & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

其中， λ 表示描述 CCD 坐标轴的斜率因子。

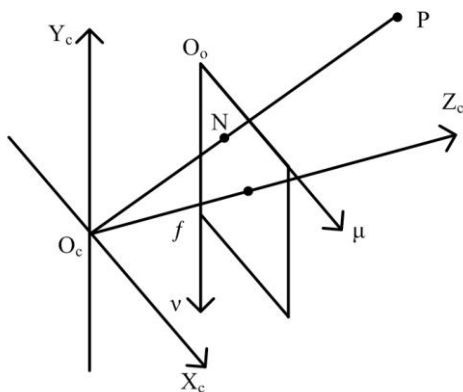


图 3-2 针孔成像原理

3.1.2 针孔成像模型

针孔成像模型^[22-23]是最理想的摄像机成像模型。它是在简单的针孔成像理论基础上,添加刚体的旋转和平移矩阵而来,并不考虑透镜和 CCD 成像的畸变影响,是摄像机标定技术和其他成像模型的基础,如图 3-2 所示。

其中, $O_c - X_w Y_w Z_w$ 为摄像机坐标系, $O_o - uv$ 为图像坐标系; P 点为被测物轮廓表面物点, 摄像机坐标系位置 $O_o - uv$; N 为对应 CCD 成像像素点, 图像坐标系位置为 (x, y) , 单位为像素物理长度; f 为镜头焦距。根据投射成像关系式有:

$$x = \frac{f \cdot X_c}{Z_c} \quad y = \frac{f \cdot Y_c}{Z_c} \quad (3-4)$$

进一步改写, 得到齐次矩阵变换关系式:

$$Z_c \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

将公式 (3-3)、(3-2) 带入公式 (3-5), 可以得到世界坐标系与图像坐标系的变换关系式:

$$\begin{aligned} Z_c \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1/d_x & \lambda & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R & T \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f/d_x & \lambda f & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times [R \quad t] \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K \times [R \quad t] \times \tilde{X} = P \times \tilde{X} \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中, 矩阵 $[R \quad T]$ 称为摄像机外参数矩阵, 包括旋转矩阵和平移向量; K 称为摄像机内参数矩阵; (u_0, v_0) 为图像中心坐标; P 为 3×4 矩阵称为摄像机投影矩阵。

3.1.3 非线性畸变成像模型

理想的摄像机成像模型为针孔模型, 但是现实当中摄像镜头存在各种误差, 并不能简单的等效于针孔成像, 造成实际像点与线性模型下的像点位置存在偏差, 特别是远离摄像机光轴方向的像点有更大的畸变误差, 非线性畸变主要分为如下几类^[24]。

(1) 径向畸变。由于摄像机光学组合透镜系统中，透镜形状存在缺陷从而使实际像点产生径向误差，在忽略高幂次项情况下，径向畸变可等效为：

$$\begin{cases} \delta_{ur} = ku(u^2 + v^2) \\ \delta_{vr} = kv(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 k 为径向畸变参数。

(2) 偏心畸变。在摄像机光学透镜系统中，由于制造和加工误差造成组合透镜光心不在一条直线造成的像点偏移，偏心畸变包含径向畸变和切向畸变分量，在忽略高幂次项情况下，偏性畸变可等效为：

$$\begin{cases} \delta_{ud} = p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv \\ \delta_{vd} = p_2(u^2 + 3v^2) + 2p_1uv \end{cases} \quad (3-8)$$

其中 p_1 和 p_2 为偏心畸变参数。

(3) 棱镜畸变。主要是由于镜头设计制造和操作及摄像机组组合过程中引起的镜头缺陷，在忽略高幂次项的情况下，可用如下公式等效：

$$\begin{cases} \delta_{up} = s_1(u^2 + v^2) \\ \delta_{vp} = s_2(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (3-9)$$

其中 s_1 和 s_2 为薄棱镜畸变参数。

综上所述，在考虑摄像机畸变之后，非线性畸变模型相对于线性模型只是在成像点位置发生偏移，因此非线性畸变模型可由以下公式描述：

$$\begin{cases} u_d = u + \delta_u(u, v) \\ v_d = v + \delta_v(u, v) \end{cases} \quad (3-10)$$

其中， (u_d, v_d) 为理想线性模型下的像点坐标； (u, v) 为摄像机实际的像点坐标； $\delta_u(u, v)$ 和 $\delta_v(u, v)$ 为畸变校正参数，只与像点坐标相关，表达式如下：

$$\begin{cases} \delta_u(u, v) = ku(u^2 + v^2) + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + s_1(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) = kv(u^2 + v^2) + p_2(u^2 + 3v^2) + 2p_1uv + s_2(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (3-11)$$

Tsai^[7]指出在对摄像机进行标定时，不易考虑过得非线性畸变参数，否则会引起解得不稳定，降低标定精度。在现有生产工艺技术下，只考虑径向畸变的影响足以满足测量要求，因此 (3-10) 式可以进一步简化为：

$$\begin{cases} u_d = u + ku(u^2 + v^2) \\ v_d = v + kv(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (3-12)$$

正如上述分析的一样，非线性模型只是在线性模型的基础上进行非线性校正

处理。在工业级机器视觉测量系统中，只要当使用广角镜头时才考虑偏心畸变和薄棱镜畸变，一般只考虑径向畸变就满足测量要求。

3.2 单目摄像机标定方法

由已知的空间三维坐标点与对应二维图像求解摄像机内外参数及非线性畸变参数过程，称之为摄像机标定。在过去的二十多年，随着基于机器视觉测量系统的不断应用，根据不同的应用背景提出许多不同的标定方法，并取得了一系列应用成果。

从广义范围来讲，摄像机标定方法主要分为如下几类^[25]：主动视觉摄像机标定方法优点就是校准步骤简单，系统鲁棒性高，适用性更强，缺点就是校准过程复杂，需要加工高精度的辅助设备，实验成本较高，不是一般单位和个人能够承受的起；摄像机自标定法不需要高精度的标定物和辅助设备，利用多幅图像特征点之间位置变换关系完成摄像机标定，优点是标定过程简单，灵活性高，能适合于各种成像模型摄像标定，缺点是标定精度低；传统摄像机标定方法是利用标定特征参考点已知的空间标定物与其对应像点坐标求解摄像机内外参数及畸变参数过程，优点校准精度高，鲁棒性，缺点就是校准过程较复杂，需要加工一块高精度标定物。对于一些标定精度要求很高且摄像机成像光路不时常变动的场合，传统的摄像机标定方法为首选，Tsai Rgoer 的两步法是目前应用最为广泛的单目传统摄像机标定方法。

3.2.1 Tsai 两步法

两步法(Two-Stage)^[7,25-28]，又称为径向约束法，是由 Tsai 和 Rgoer 为代表于 1986 在 SPIE 会议首次提出，并获得当年优秀论文奖。首先利用针孔成像模型的透视变换矩阵方法求解摄像机外部参数，即旋转和平移矩阵 R 和 T ，再考虑摄像机镜头畸变影响，通过初值迭代的计算内部参数，即有效焦距 f 和径向畸变参数 k ，这个过程称之为两步法。

Tsai 的论文中假设 CCD 每一个像素的物理尺寸 d_x 和 d_y 已知，并又 CCD 生产厂商提供，只考虑径向畸变的情况下，非线性标定模型可以大大的简化，如公式 (3-12) 式所示，Tsai 两步法基本概述如下：

第一步：由于摄像机坐标与图像坐标之间的平行关系，可以得到如下公式：

$$\frac{u}{v} = \frac{x_c}{y_c} = \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + t_x}{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + t_y} \quad (3-13)$$

进一步采取齐次矩阵变换可得：

$$[vx_w \quad vy_w \quad vz_w \quad v \quad -ux_w \quad -uy_w \quad -uz_w] \times \begin{bmatrix} r_1/t_y \\ r_2/t_y \\ r_3/t_y \\ t_x/t_y \\ r_4/t_y \\ r_5/t_y \\ r_6/t_y \end{bmatrix} = u \quad (3-14)$$

其中，公式 (3-13) 只有 7 个未知数，同时利用旋转矩阵 R 的正交特性，采用 $N \geq 7$ 特征采样点 (u_i, v_i) 就可以求出矩阵 R 和平移矩阵 T 的 t_x 和 t_y 参数。

第二步：考虑摄像机镜头畸变影响，则式 (3-4) 等效于：

$$\begin{cases} u_d = \frac{f \cdot X_c}{Z_c} = u(1 + k(u^2 + v^2)) \\ v_d = \frac{f \cdot Y_c}{Z_c} = v(1 + k(u^2 + v^2)) \end{cases} \quad (3-15)$$

其中，设 $H_x = r_1x_w + r_2y_w + t_x$ ， $H_y = r_4x_w + r_5y_w + t_x$ ， $W = r_7x_w + r_8y_w$ ， $f_k = f \times k$ 可得：

$$\begin{cases} H_x \cdot f + H_x \cdot (u^2 + v^2) \cdot f_k - u \cdot t_z = u \cdot W \\ H_y \cdot f + H_y \cdot (u^2 + v^2) \cdot f_k - v \cdot t_z = v \cdot W \end{cases} \quad (3-16)$$

对于 N 个特征采样点，采取最小二乘法对上述公式进行最优求解，则可联立求出 f 、 k 、 t_z 的值。经过上述两步的计算，从而完成两步法的内外标定参数求解。

正如上述分析的一样，Tsai 两步法在线性模型基础上，引入非线性畸变校正，虽然在一定程度上提高了标定精度，但是还是不可避免的存在算法步奏复杂，标定速度慢，稳定性差等问题。

3.3 线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法

由于测量系统采用的是固定摄像机模式，一旦摄像机位置调至合适位置马上锁定，而上述两步法基本上都要从不同的角度获取多幅标定物图像，简单的引入两步法到在多传感器机器视觉测量系统有很大难度。另外由于双目摄像机分居被测物两侧获取左、右光带图像，而两幅图像之间重叠的区域非常少，必须考虑多个摄像机之间的位置关系和后期图像数据的配准问题，因此双目视觉测量系统中必须采取先单独标定后轮廓融合的“两步法”。在该思想指引下，本文提出具有本文特色的线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法^[29-31]，该标定方法主要分为

两大部分：双目摄像机标定和系统标定误差校正。

3.3.1 双目摄像机标定基础

在测量系统框架搭建完成后，调节右摄像机和左摄像机二维固定支架，简称为摄像机 1 和摄像机 2，使摄像机光轴与被测钢坯中心点等高，然后在调节水平旋转轴使摄像机视场完全包含整个测量区域并锁死二维固定支架；根据测量要求，通过粗调线结构激光器 1、2 和 3 的一维移位平台使激光器基本共面，然后微调摆弧臂使三只激光器完全共面，且共面平面平行与摄像机共面平面。如图 3-3 所示。

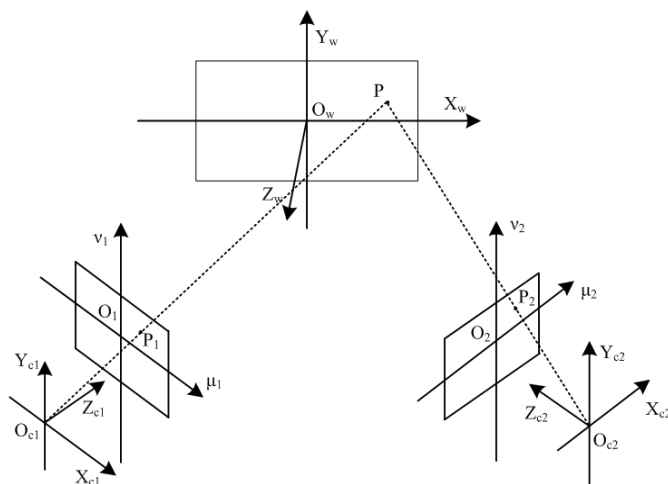


图 3-3 摄像标定原理示意图

其中， $O_w - X_w Y_w Z_w$ 以标定板平面空间建立起的世界坐标系，即测量范围世界坐标系， Z_w 轴为钢坯行进方向； $O_{c1} - X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 和 $O_{c2} - X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 分别为摄像机 1 和摄像机 2 的摄像机坐标系， O_{c1} 和 O_{c2} 分别为镜头光心， Z_{c1} 和 Z_{c2} 轴分别与摄像机 1 和摄像机 2 光轴重合，相交于 O_w ； $O_{i1} - \mu_1 v_1$ 和 $O_{i2} - \mu_2 v_2$ 为摄像机 1 和摄像机 2 的空间图像坐标系，分别与 $O_{c1} - X_{c1} Y_{c1}$ 平面和 $O_{c2} - X_{c2} Y_{c2}$ 平面相互平行； P 点为空间标定板平面特征参考点， P_1 和 P_2 为其在对应摄像机 1 和摄像机 2 的像素点坐标。当钢坯垂直激光平面向前运行，激光平面在钢坯表面形成一个环形轮廓光带，摄像机 1 和摄像机 2 对称分别获取钢坯左、右半个轮廓光带。

3.3.2 双目摄像机标定

通过上述分析可知，空间某一物点必须经过刚体变换、镜头畸变、摄投影变换等光路变换才能在 CCD 平面成像^[31]，而整个光路变换是一个连续，对偶的过程，因此可以利用矩阵的知识，对整个光路变换矩阵进行有效的合并，便可获得简化后的变换矩阵，例如 Zhang 平面标定^[8]过程中对于摄像机的内部和外部参数已经有

所弱化, 特别外部参数并没有去计算, 而是把外部参数 f 和 k 隐藏在内部参数矩阵 A 的 α 和 β 当中。鉴于该思想指导下, 本文提出的双目摄像机标定方法, 对于摄像机的内外参数矩阵进行合并获得简化后的关系式如下:

$$\begin{cases} x = a + bu + cv + du^2 + euv + fv^2 \\ y = g + hu + iv + ju^2 + kuv + lv^2 \end{cases} \quad (3-21)$$

进一步改写成矩阵模式:

$$\begin{bmatrix} a & b & c & d & e & f \\ g & h & i & j & k & l \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & u & v & u^2 & uv & v^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

其中, 一次项参数为旋转平移映射关系式, 舍去了高幂次项, 只保留二次项参数作为摄像机畸变修正, 增加算法的稳定性; (a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 、 j 、 k 、 l) 为待定标定系数, 简称隐参数; (x, y) 表示标定板世界坐标系中的某一个特征点坐标, 单位毫米; (u, v) 表示特征参考点对应像点图像坐标, 单位像素。

通过制作一块高精度平面标定板, 已知参考点世界坐标及其对应像点图像坐标利用式 (3-22) 便可求得标定参数。为了进一步提高标定精度, 一般选取参考点大于隐参数个数, 且均匀分布的特性, 再通过最小二乘法求出最优解。

假定在标定板上选取 $N \geq 6$ 个参考点, 那么相应特征参考点的图像坐标可构造 $2N \times 12$ 矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & u_1 & v_1 & u_1^2 & u_1v_1 & v_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & u_2 & v_2 & u_2^2 & u_2v_2 & v_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & u_n & v_n & u_n^2 & u_nv_n & v_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_1 & v_1 & u_1^2 & u_1v_1 & v_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_2 & v_2 & u_2^2 & u_2v_2 & v_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_n & v_n & u_n^2 & u_nv_n & v_n^2 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

称为矩阵 A , 而参考点的世界坐标可以构成 $2N \times 1$ 矩阵:

$$B = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n \ y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n]^T \quad (3-24)$$

称为矩阵 B , 而 12 个标定隐参数则可以构成矩阵 C :

$$C = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g \ h \ i \ j \ k \ l]^T \quad (3-25)$$

由最小二乘法矩阵运算可得：

$$C = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (3-26)$$

通过上述计算可以 12 个标定隐参数，一旦标定系数确定，图像中任意一点的世界坐标系可以按式（3-21）进行计算，从而完成单个摄像机的标定。

由于在整个测量系统标定过程中标定板采用统一的世界坐标系进行标定，因此标定还原后的轮廓图像就可以经过简单图像相加融合获得完整的轮廓数据，从而避免了采取复杂的图像匹配融合算法，既提高算法运行速度，也保证系统测量精度的一致性。在实际标定过程中，为了提高图像数据的融合精度，选取有效测量范围内统一的特征点作为参考点。

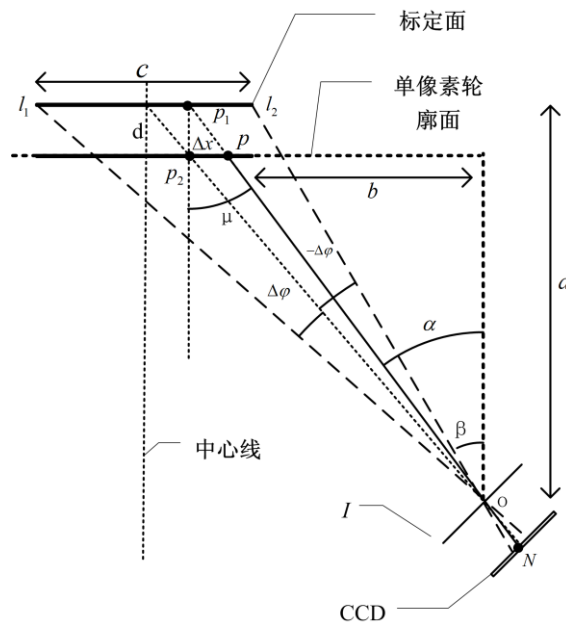


图 3-4 标定误差简易几何路径示意图

3.3.3 系统标定误差校正

经过上述处理获得了完整融合后的钢坯图像，再对融合后的二维钢坯轮廓图像尺度数据分析发现相较于真实的光切面轮廓尺度数据，融合后的图像轮廓尺度测量数据存在一定的失真，经过大量的实验验证失真原因主要是在钢坯断面光带图像经过图像预处理，细化从而获得一条单像素轮廓之后，再对单像素轮廓数据进行图像还原，获得光切面的非畸变轮廓图像，在经过上述一系列步骤之后，无法保证单像素轮廓面与标定面属于同一个平面^[26,32-33]，从而造成融合图像轮廓数据失真。当标定面在单像素轮廓面前方时，图像轮廓测量尺度数据偏大，当标定面在单像素轮廓面后方时，图像轮廓测量尺度数据偏小。为了能够补偿在标定面与单

像素轮廓平面不共面的问题，作如下分析：

如图 3-4 所示，它表示的是摄像机 2 标定误差简易几何路径示意图。为了便于分析，采取标定面在单像素轮廓面后面的情况，标定板世界坐标系轮廓点 x 方向与摄像机图像坐标系像点 u 方向标定误差分析过程，由式 (3-21) 可知 y 方向和 v 方向的标定误差分析也是如此不再累赘。

其中， I 表示摄像机镜头简易透镜， o 为透镜光心； a 表示透镜光心到定标面的距离； b 表示透镜光心到标定区域边缘的距离； c 表示系统的标定区域宽度； $G = c / \sqrt{a^2 + b^2}$ 称为距离比重； α 表示 $l_1 o l_2$ 角平分线与测量区域中心线的夹角； $\pm \Delta \varphi$ 表示 $l_1 o l_2$ 角平分线与测量区域边缘的夹角； p 表示在单像素轮廓面上的某一物点； N 表示物点 p 在 CCD 上对应像点； p_1 为 op 延长线与标定平面的交点，表示像点 N 标定还原后对应世界坐标系的物点位置； p_2 表示过 p_1 平行于中心线与单像素轮廓面的交点； d 为标定平面与单像素轮廓面的距离； β 为 op 与中心线的夹角值； Δx 为 p_2 到 p 点的距离，称为摄像机标定 x 方向误差。在摄像机的标定过程中，由于调整模块精度、感官误差、镜头畸变效应等不可控因素的影响，造成光带单像素轮廓面和标定面会存在一定的前后平移，而平移参数 d 的大小就直接决定还原后图像 x 坐标平移参量 Δx 的大小，而 Δx 的大小决定了整个钢坯轮廓数据的精度。为了进一步研究作如下推导过程：

在摄像机标定完成后，单像素轮廓面和标定面可以简化成为了一个相对固定的平行的平面，因此平移参数 d 就是一个常数，进一步就有：

$$\beta = \alpha + \theta \quad (3-27)$$

其中 $-\Delta \varphi \leq \theta \leq \Delta \varphi$ ，根据平行三角公式可知：

$$\tan \beta = \tan \mu = \frac{\Delta x}{d} \quad (3-28)$$

进一步替换可得：

$$\Delta x = \left(\tan \alpha + \frac{\tan \alpha^2 \times \tan \theta + \tan \theta}{1 - \tan \alpha \times \tan \theta} \right) \times d \quad (3-29)$$

由于夹角 α 和距离 d 都为已知常数，定义 $B = \tan \alpha$ ， $A = \tan \alpha \times d$ 。等式可进一步化简如下：

$$\Delta x = A + \frac{B^2 + 1}{\frac{1}{\tan \theta} - B} \times d \quad (3-30)$$

由上述可判断，在摄像机标定完成后，坐标平移量 Δx 仅与夹角 θ 有关系，中

心偏差最小，摄像机边缘偏差最大。因此在距离比例重 G 较小的情况下，通过一定误差补偿是能够保证标定精度的，同理摄像机 1 的分析也是如此不再累赘。

根据数据拟合和函数逼近原理，采取最小二乘法对坐标平移参量 $(\Delta x, \Delta y)$ 函数逼近，在图像标定还原后把坐标平移参量 $(\Delta x, \Delta y)$ 反向补偿到融合后的图像。如果采取以摄像机 1 和摄像机 2 单独进行平移参量 $(\Delta x, \Delta y)$ 进行数据拟合是一个很复杂的过程，对于高速的工业测量是不可行的。为了降低整个数据拟合算法，在这里采取以摄像机 1 和 2 分别获取标准圆型工件的左、右光切面轮廓图像，然后通过图像处理，再分别对图像 1 和 2 进行标定还原获得非畸变的光切面轮廓图像，最后通过圆心拟合算法分别求出左、右非畸变轮廓图像在统一图像坐标系中各自的圆心坐标，并记录下轮廓圆心坐标之差的数据从而求出系统的拟合误差校正系数。考虑算法和解的稳定性，舍去高次幂项得线性拟合公式如下：

$$\begin{cases} \Delta x = p_1 + p_2 u + p_3 v \\ \Delta y = q_1 + q_2 u + q_3 v \end{cases} \quad (3-31)$$

其中， (u, v) 表示为摄像机 2 获取的圆型拟合圆心坐标，采取以摄像机 1 图像坐标系为参考坐标进行图像坐标系的统一； $(\Delta x, \Delta y)$ 表示摄像机 1 和摄像 2 圆型工件拟合圆心坐标之差； $(p_1, p_2, p_3, q_1, q_2, q_3)$ 表示待定误差校正系数。通过合理的区域划分，只需把圆形工件任意放置在 3 个测量位置，利用式 (3-31) 就可以求出相应 6 个待定系数。

待待定系数确定之后，通过图像预处理和标定还原过程分别获得非畸变左、右轮廓图像，此时由圆心拟合算法求出左轮廓非畸变图像的圆心坐标 (u_0, v_0) ，再把坐标点 (u_0, v_0) 代入式 3-31 可以确定该帧图像的补偿坐标误差 $(\Delta u_0, \Delta v_0)$ ，最后把坐标误差 $(\Delta u_0, \Delta v_0)$ 反向补偿到融合后的图像中，从而完成测量系统的误差校正。拟合系数求解类似于隐参数求解过程不再累赘。

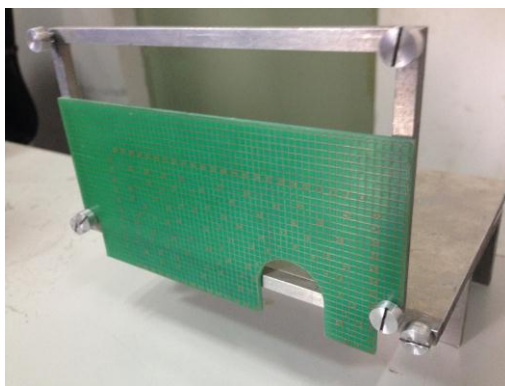


图 3-5 高精度标定板及移位固定框架

3.3.4 系统标定实验及其结果

在摄像机标定过程中，线结构激光器调整共面之后，通过调整移位支撑架使标定板与激光平面基本重合并锁死。如图 3-5 所示，专门订制了一块高精度的标定板，标定板面积 $100\text{mm}\times 60\text{mm}$ ，每一个正方形网格大小 $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ ，十字交叉线为特征参考点，以左下角坐标原点。该测量系统的测量有效范围为激光光平面内的 $64\text{mm}\times 48\text{mm}$ 范围。

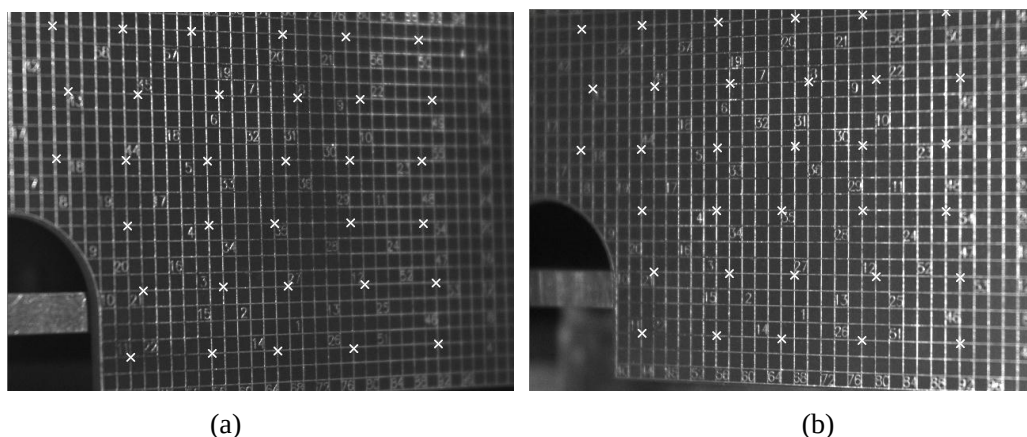


图 3-6 摄像机获取标定板图像

(a) 摄像机 1 获取标定板图像；(b) 摄像机 2 获取标定板图像

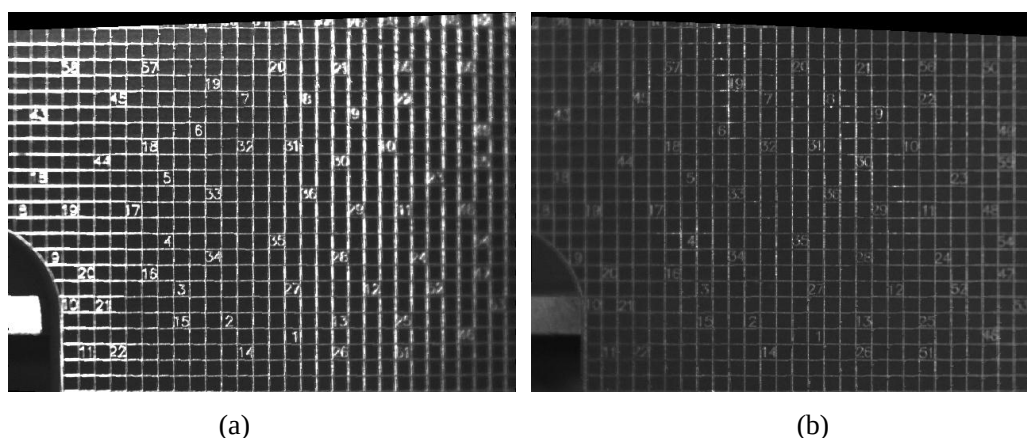


图 3-7 摄像机标定还原验证图像

(a) 摄像机 1 标定板图像还原后图像；(b) 摄像机 2 标定板图像还原后图像

如图 2-2 所示，由于棒材生产线高度抖动，因此钢坯在整个导槽内无规则自由运动。为了保证系统的测量精度，必须对整个导槽区域进行标定，在标定参考点

的选取上均匀分布在整個測量範圍，在這裡均勻選取了 33 個特徵參考點，並將其世界坐標事先輸入到校正程序中，生成矩陣 B 。如圖 3-6 所示為攝像機 1、2 拍攝的標定板畸變圖像。

首先啟動標定程序，通過角點檢測求出標定圖像中的十字角點，並篩選出已知的 33 個參考點在相應圖像中的坐標位置（如圖 3-6 中 $\times$ 形點），以圖像左下角圖像坐標系原點，生成矩陣 A ，利用 3-26 式自動計算隱參數矩陣 C 中的 12 個標定系數，從而完成攝像機標定。標定參數如表 3-1 和表 3-2 所示，並把標定圖像進行還原驗證，如圖 3-7 所示為標定板還原後的世界坐標系圖像，精度為 0.1mm。

表 3-1 攝像機 1 的 12 個標定參數(mm/pixel)

a	b	c	d	e	f
18.643722	0.123571	-0.000236	0.000024	0.000000	-0.000001
g	h	i	j	k	l
-2.426447	-0.004630	0.113614	0.000001	0.000019	0.000000

表 3-2 攝像機 2 的 12 個標定參數(mm/pixel)

a	b	c	d	e	f
20.300483	0.147863	-0.000307	-0.000021	0.000000	0.000001
g	h	i	j	k	l
-6.572576	0.004802	0.123203	0.000000	-0.000018	0.000000



圖 3-8 誤差校正圓形工件

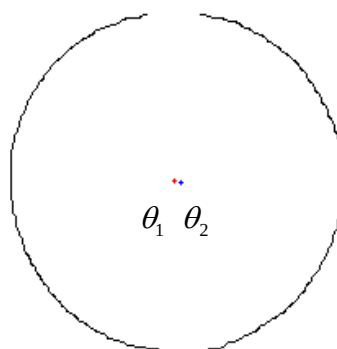


圖 3-9 誤差校正前圓形工件融合圖

在計算出測量系統 24 個標定參數後，把標定參數輸入到事先已經設計好的標定誤差校正程序中。此時為了能夠獲得較為理想的誤差校正效果，用一個直徑 23mm 的圓型工件在測量區域內游走並記錄下圓心坐標差 $(\Delta u, \Delta v)$ ，如圖 3-8 所示。

图 3-9 为误差校正前左、右轮廓非畸变图像 1 和 2 的融合图像，其中深色十字心表示图像 1 轮廓的圆心拟合坐标 θ_1 ；浅色十字心表示图像 2 轮廓的圆心拟合坐标 θ_2 。

然后利用圆形工件在测量区域内自由游走并记录下的足够多的圆心坐标误差。为了提高函数拟合精度，从中筛选出均匀分布的 25 不同位置的圆心坐标误差值，代入式 (3-31) 中，用最小二乘法求出拟合系数，见表 3-3。

表 3-3 系统误差校正系数(mm)

p_1	p_2	p_3
1.473941	0.004891	-0.002980
q_1	q_2	q_3
0.061430	-0.000644	-0.000465

最后把上述标定参数和误差校正参数输入到验证软件系统，还是以圆形工件作为被测物体验证系统误差测量精度，结果如图 3-10 所示，它表示误差校正后圆型工件左、右轮廓合成融合图像，圆心坐标误差控制在 1 个像素以内。图 3-11 表示加入误差校正后的标定还原图像相加融合结果，整个图像融合已经相当完整。

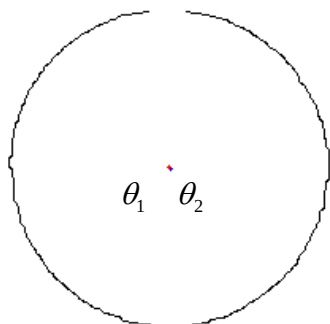


图 3-10 误差校正后圆形工件融合图

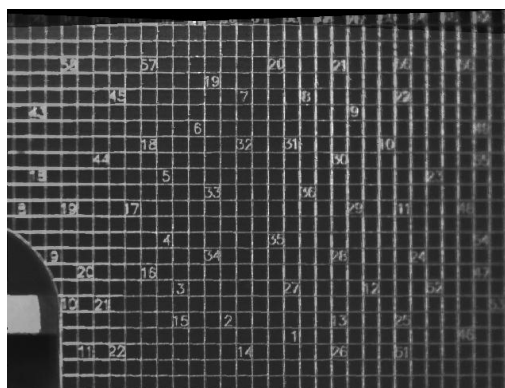


图 3-11 误差校正后的标定板融合图

3.4 本章小结

本章介绍了两种常用的摄像机标定模型，探讨了 Tsai 两步法在单目摄像机标定过程。针对双目线结构光测量系统的要求和特点，提出了具有本文特色的线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法，对双目摄像机标定误差做了详尽的分析，相较于两步法，在摄像机标定过程中只需要获取一副标定物图像，通过获取足够的标定参考点就可以完成摄像机标定，大大简化了摄像机标定步骤，而且标定精度上能够与两步标定法相媲美，最后给出详尽的系统标定步骤和实验结果数据。

第四章 钢坯表面轮廓和缺陷图像处理算法及其参数测量研究

高温钢坯机器视觉在线检测系统在系统设计和检测原理上都有区别于国外同类系统，测量系统不仅要完成轮廓提取和计算，还要判断钢坯表面缺陷，对于整个测量系统，图像处理算法就成了算法设计的一个重要环节。通过图像处理，可以获取想要的目标图像信息，并进行提取和计算等；另外通过设计图像处理算法流程，可以让软件自动完成图像处理计算并判断结果。在检测系统轮廓测量中，光带的单像素提取、断线的连接，轮廓参数的计算；在检测系统表面缺陷判断中，钢坯的锁定、铁销的提取、裂纹的判断等等类似问题，都是高温钢坯机器视觉在线检测系统需要研究的关键问题。

4.1 钢坯轮廓光带图像预处理

高温钢坯机器视觉在线检测系统中，经过锁定成像处理获得了钢坯轮廓光带图像，滤除掉背景光对光带的影响，但是由于钢坯表面反射率不均匀，轮廓的不均变形等因素，都会造成光带的缺损，边界不平滑等缺陷，因此在进一步处理前，需要对钢坯轮廓光带进行预处理。

4.1.1 图像均值滤波

由于钢坯光带图像内部缺损和边界的不平滑，从而造成图像二值化不完整和图像的毛刺和噪点的存在，最终影响轮廓参数测量的有效测量。因此本文采用均值滤波^[34]的方法，既能平滑掉图像中的噪声，又能补充图像的细节，达到了平滑边界的目的。

首先选定一个 $w \times w$ 大小模板，每一个模板元素加权为 1，然后通过计算模板加权均值 $g(x, y)$ 用以替代当前像点 (x, y) 的灰度值成为均值滤波，用公式表达如下所示：

$$g(x, y) = \frac{\sum_{i=-w/2}^{w/2} \sum_{j=-w/2}^{w/2} f(x+i, y+j)}{w \times w} \quad (4-1)$$

本文采取 3×3 模板的均值滤波，如图 4-1 表示对锁定成像后获取的钢坯轮廓光带图像进行均值滤波试验，其中，以贵钢 $\phi 22$ 圆型中空钢和 $H22$ 六角中空钢现场生产实验获取的锁定图像为处理对象。

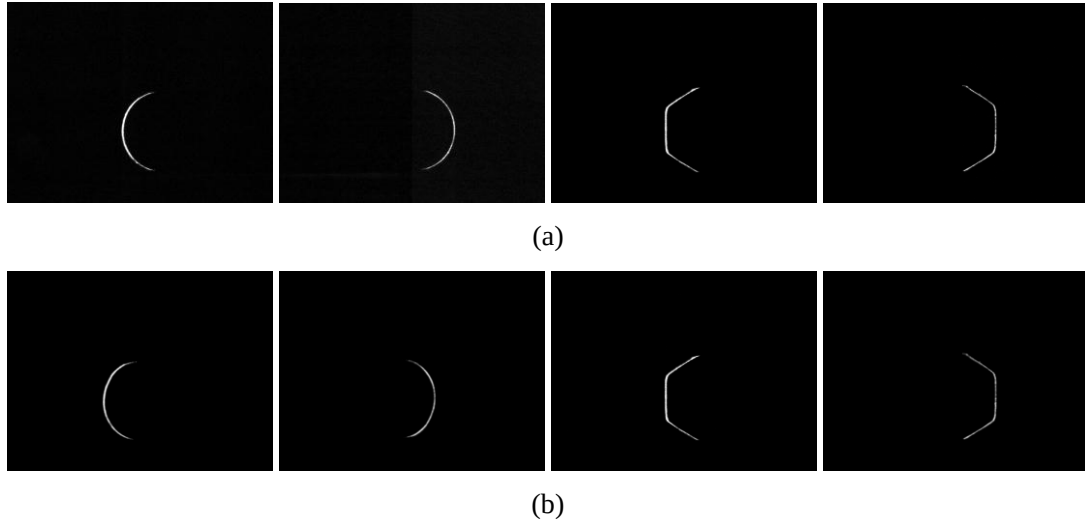


图 4-1 钢坯光带图像滤波效果图

(a) 锁定成像处理后的钢坯轮廓图像；(b) 均值滤波后的钢坯轮廓图像

4.1.2 OTSU（大津法）

二值化（阈值分割）是一种典型的图像分割技术^[34-36]，它主要根据前景色和背景色的灰度差来达到提取目标图像的目的。最常用的二值化方法，就是选用一个阈值 τ 来分割图像 $f(x, y)$ ，通过阈值判断产生一幅新的二值图像 $\tilde{f}(x, y)$ ，公式如下所示：

$$\tilde{f}(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq \tau \\ 0 & f(x, y) < \tau \end{cases} \quad (4-2)$$

由于钢坯轮廓检测尺寸不是固定的，而且线结构光激光光强分布高斯模式（中心能量高，两边能量低），同时，在轧钢生产过程中钢坯在导槽内随意跳动，因此钢坯断面的光带灰度是随时变化。对于采取固定阈值分割的方法几乎不可能，而且会舍去掉许多轮廓细节，必须采取一种动态阈值方法。因此本文采取最大类间方差法作为图像分割算法，即俗称大津法(OTSU)，是一种自动的无参数无监督的自动阈值分割算法。算法的基本步奏归纳如下：

假定图像共 L 个灰度层 $(0, 1, \dots, L-1)$ ，第 i 个灰度层的像素数为 $N(i)$ ，那么图像共有 $N = N(0) + N(1) + \dots + N(L-1)$ 像素数。那么进一步有：

$$P(i) = N(i) / N \quad (4-3)$$

其中， $P(i)$ 称为第 i 个灰度级的概率。阈值 τ 将图像划分为 $C1$ 和 $C2$ 两大类， $C1$ 为亮区， $C2$ 为暗区，则类间方差 σ 有：

$$\sigma = a1 \times a2 (u1 - u2)^2 \quad (4-4)$$

式中, $a1$ 为 $C1$ 相对总的图像像素数的占有比, $a2$ 为 $C2$ 相对总的图像像素数的占有比, 即 $a1 = \sum_i P(i)$, $a2 = 1 - a1$; $u1$ 为类 $C1$ 的均值, $u2$ 为类 $C2$ 的均值, 即 $u1 = \sum_0^t [i \times P(i)] / a1$, $u2 = \sum_{t+1}^{L-1} [i \times P(i)] / a2$ 。算法选择最佳阈值 τ 使类间方差最大:

$$\sigma_b = \max(a1(t) \times a2(t) \times \Delta u^2) \quad (4-5)$$

其中 $\Delta u = u1 - u2$, 最后利用 τ 作为阈值完成对图像的二值化工作。如 4-2 所示, 它对图 4-1(b) 滤波后光带图像的采取 OTSU 处理后得到的二值图像。

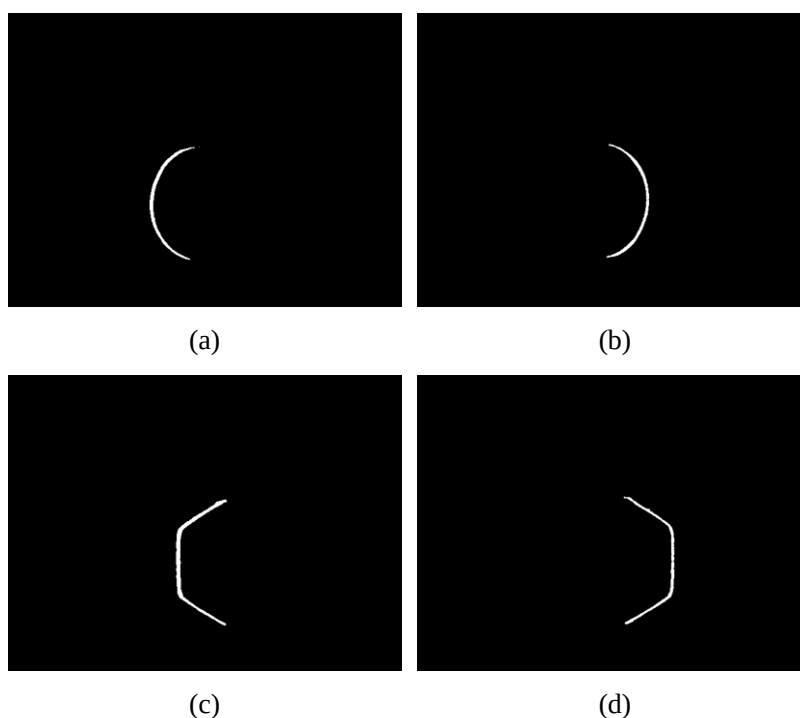


图 4-2 钢坯光带轮廓图像二值化效果图

(a) 圆钢右轮廓二值化效果图; (b) 圆钢左轮廓二值化效果图; (c) 六角钢右轮廓二值化效果图; (d) 六角钢左轮廓二值化效果图

4.2 轮廓图像处理算法及其测量参数研究

经过上述一系列步骤的处理, 获得钢坯光带轮廓的二值图像, 因此如何提取和计算钢坯轮廓尺度参数成为了测量系统研究的关键问题之一。许多学者在这方面提出许多方法, 对于线结构光机器视觉测量系统, 总的来说都是先光带中心提取获得单像素轮廓图像, 然后进行标定还原, 再根据不同的轮廓形状采取不同的算法获取尺度参数。其中, 光带图像中心的提取算法的稳定性, 不仅决定了轮

廓测量参数的精度，而且对系统的标定也至关重要。

近年来人们提出了许多细化算法，主要分为串行细化^[38-39]、并行细化^[40-44]和混合细化算法^[45]。从理论上上来看，串行细化处理结果主要取决于像素处理的先后次序，具有不可预测性，而并行细化处理是利用相同的匹配条件对整幅图像进行处理，因此其结果拥有各向同性。从时间上来看，串行细化算法删除边缘点效率高，彻底，细化时间短，但容易产生非对称的骨骼结构，而并行细化处理由于先校验后删除，因此不容易产生非对称骨骼结构，但细化时间相对较长，对于有细化后的线条宽度不够彻底。但总的来说并行细化算法优于串行细化算法，中心提取更加稳定。混合算法就是综合串行和并行算法的优点提出的算法，采取的细化措施主要是两方面：先使用并行细化算法进行细化，后在采取串行算法进行彻底细化，后采用并行细化的方法或模板做串行细化处理，混合算法虽然能够获得较为理想的细化效果但耗时最长，只能在一些特定情况下使用。

4.2.1 钢坯单像素轮廓图像提取

综上所述，在钢坯光带中心提取算法上选取 Zhang 并行细化算法^[42]，虽然并行细化算法都存在着细化不完全的问题，这种算法缺陷的主要存在于交叉和大曲率交点处细化，例如在十字型和 T 型交叉处。但是对于被测的圆钢和六角钢来说曲率半径都比较小，圆钢的曲率半径就是半径 R ；六角钢边长的曲率半径为 0，由于六角钢孔型六个角都采用圆弧设计，曲率半径为设计半径 $R2$ ；另外在激光器线宽选取上采用窄线宽激光器，保证钢坯断面光带的均匀变化，进一步提高算法的稳定性，保证了细化的单像素。

4.2.1.1 Zhang 快速并行细化算法

在 1985 年前后，美国学者 Zhang 提出了一种并行快速细化算法，该算法细化速度快，保持细化后曲线的连通性和无毛刺等优点，一经发表便得到广泛的重视。首先定义 3×3 参考模板内中心点为目标像素点，而其周围 8 连通邻域中至少拥有一个背景点，其中目标点表示为 1，背景点表示为 0，算法处理过程如下所示：

P9	P2	P3
P8	P1	P4
P7	P6	P5

图 4-3 8 邻域模板结构图

Step1: 如图 4-3 所示表示 3×3 参考模板。其中, 边界目标像素点记为 $P1$, 8 连通领域像素点记为 $P2, \dots, P9$, 轮廓边界目标点删除条件如下:

- a) $2 \leq N(P1) \leq 6$
- b) $S(P1) = 1$
- c) $P2 \times P4 \times P6 = 0$
- d) $P4 \times P6 \times P8 = 0$

其中, $N(P1)$ 是 $P1$ 的非零邻点的个数, $S(P1)$ 表示以 $P2$ 起始点沿着 8 连通域顺时针方向查找 0 到 1 变化的次数。当图像遍历一边完成之后, 将所有满足上述条件的边界目标点去除。

Step2: 同 Step1 步骤操作, 仅将 $P2 \times P4 \times P8 = 0$ 替代 c 条件, $P2 \times P6 \times P8 = 0$ 替代 d 条件其他不变, 同理对凡是满足新条件的边界目标点去除。

通过上述两步不断循环迭代操作处理, 直到没有再满足删除条件的目标点为止, 此时细化余下的像素点就组成了目标中心像素骨架。如图 4-4 表示对图 4-2 细化处理后的钢坯轮廓图像, 不仅取得光带图像中心骨骼, 而且很好的保持了钢坯轮廓细节连通性。

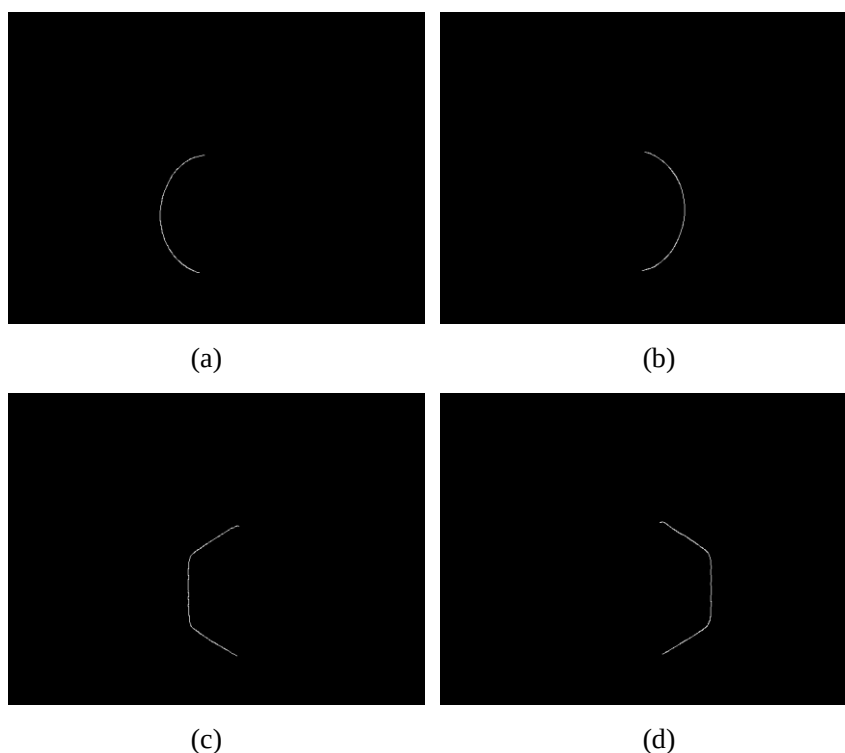


图 4-4 钢坯轮廓图像细化算法处理效果图

(a) 圆钢右轮廓细化效果图; (b) 圆钢左轮廓细化效果图; (c) 六角钢右轮廓细化效果图; (d) 六角钢左轮廓细化效果图

经过细化后，根据式 (3-21)，利用事先标定好的摄像机标定参数（如表 3-1 和表 3-2）和系统误差校正参数（如表 3-3），进行图像轮廓标定还原和图像融合处理，从而获得完整钢坯轮廓图像，如图 4-5 所示为采用图 4-4 细化后轮廓单像素图像进行标定还原和融合后效果图，其中发现钢坯轮廓图像融合的相对理想，并没有存在明显的错位。

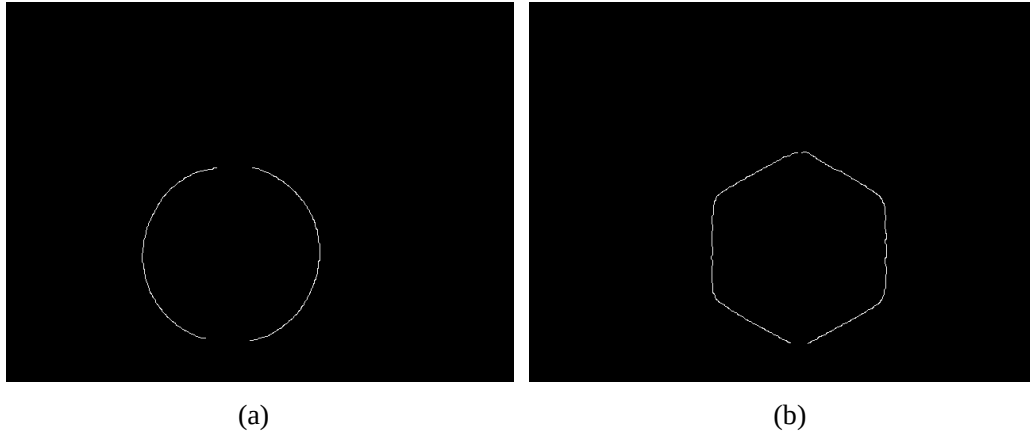


图 4-5 标定还原后的钢坯断面轮廓图

(a) 圆钢标定还原融合效果图；(b) 六角钢标定还原融合效果图

4.2.1.2 断线-曲线连接

正如上述分析所示，由于测量系统采用双目摄像机平视结构，从而造成钢坯上顶端和下顶端的断面轮廓无法获取，因此在钢坯轮廓图像融合之后，对于这部分连接成为轮廓研究的关键。根据图 1-7 和 1-8 圆钢和六角钢孔型设计可知，在圆钢的上、下顶端和六角钢的六个角，都是采用圆弧设计，因此在断线曲线连接采取二次 NURBS 曲线插值算法。

非均匀有理 B 样条曲线^[46](NURBS)是法国数学家 Versprille 在其博士论文提出的，在 1991 年，ISO 国际组织在把它作为定义工业产品几何形状唯一的数学表达式。NURBS 曲线的提出克服了 Bzier 曲线局部细节不足的问题，能够对生成插值曲线形状进行有效的控制。其中， k 次 NURBS 曲线表达式如下：

$$p(t) = \frac{\sum_{i=0}^n P_i w_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(t)} \quad (4-6)$$

$$\text{其中: } N_{i,k}(t) = \begin{cases} N_{i,0}(t) = \begin{cases} 1 & \text{当 } t \in (t_i, t_{i+1}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k+1}-t} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k}-t}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

$w_i (i=0,1,\dots,n)$ 称为加权或加权因子, $w_0, w_n > 0$, 其余 $w_i > 0$; P_i 称为曲线控制顶点; $T=[t_0, t_1, \dots, t_{n+k+1}]$ 称为非递减节点矢量; $N_{i,k}(t)$ 在此又称为 NURBS 基函数。如图 4-5 可知, 由于缺损圆弧的圆心角较小($\theta < 180^\circ$), 因此采取二次 NURBS 曲线插值^[47-49]足可以保持圆弧的局部特性, 那么式 (4-6) 可进一步化简如下:

$$p(t) = \frac{(1-t)^2 w_1 P_1 + 2t(1-t)w_2 P_2 + t^2 w_3 P_3}{(1-t)^2 w_1 + 2t(1-t)w_2 + t^2} \quad (4-8)$$

其中: P_1, P_2, P_3 称为三角控制多边形顶点, P_1 和 P_3 为圆弧端点坐标, P_2 为过 P_1 和 P_3 切线的交点; 节点矢量 T 采取最简单的 $T=[0,0,0,1,1,1]$, $w_1 = w_3$, $w_2 = \cos \theta$, $w_1 w_3 / w_2^2$ 称为形状不变因子。如图 4-6 所示, 为采取二次 NURBS 曲线插值轮廓连接效果图, 在曲线连接处即保持了原有轮廓图像的细节, 又提高了系统的轮廓测量参数精度。

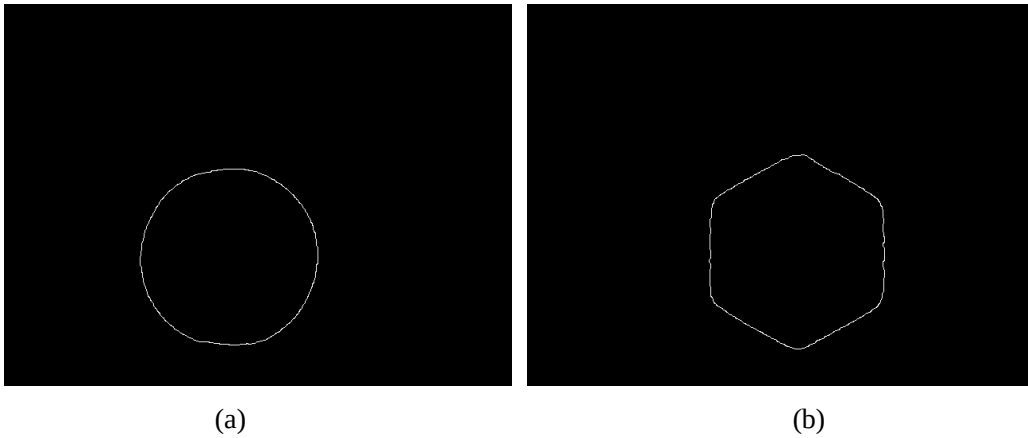


图 4-6 二次 NURBS 曲线插值轮廓连接效果图

(a) 圆钢断面轮廓曲线连接效果图; (b) 六角钢断面轮廓曲线连接效果图

4.2.2 圆钢轮廓椭圆拟合算法

经过上述算法处理, 获得钢坯断面完整二维轮廓, 虽然由于双目摄像机视场不足的原因, 导致融合轮廓存在缺损, 但是经过曲线连接还是能够保持和延续轮

廓端点处曲率变化，从而为钢坯轮廓数据拟合奠定基础。正如 1.3.1 节所述，在圆钢孔型设计中都采用双半椭圆设计。从轧机最终出来的圆钢并不是真正意义上的圆钢，而是椭圆型的“圆钢”，所以在圆钢轮廓的检测算法上采取椭圆拟合算法。

椭圆拟合算法就是利用曲线拟合知识，在已有空间样本点的基础上求出均方差最小的椭圆。在椭圆拟合算法上常用方法主要分：为霍夫曼(Hough)变换方法^[50]、最小平方中值法(LMeds)^[51]和最小二乘法(DLS)^[52]等。霍夫曼变换方法是利用参数平面和图像平面的对偶变换关系来计算，通过转换到参数平面求参数曲线交点方式来计算曲线拟合参数值，优点是对算法稳定性好，不易受噪点影响，缺点就是在时间和空间复杂度上最大；最小平方中值法是由 Gerhard Roth 等人提出的，它是利用最小平方中值不易受孤立点影响来计算椭圆，该算法最大优点鲁棒性强，是一种稳健的椭圆拟合算法，缺点就是对椭圆拟合结果没有一个很好的数学估计，需要人工评判拟合的优劣；最小二乘法是计算相对于已知数据样本点误差平方和最小的拟合曲线，和霍夫曼变换一样都是数据拟合最常用方法之一，相较于前面两种数据拟合算法，最小二乘法最大优点是时间和空间复杂度最小，缺点就是易受孤立点影响，鲁棒性较差。

在圆钢轮廓检测过程中，在经过图像一系列预处理之后，特别是锁定成像技术处理，对于图像的可能存在孤立点和噪点已经达到了很好的滤除，在椭圆拟合算法上，算法的时间和空间复杂度成为考虑的重点。因此本文选取最小二乘法^[53]作为椭圆拟合的基本算法，其中代数拟合算法是最小二乘法最为简单的直接的一种拟合算法，假设一般椭圆表达式如下：

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (4-9)$$

常数项归一化可得：

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0 \quad (4-10)$$

利用已知离散样本点直接采取最小二乘法，也即对应目标函数：

$$F(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^m (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + 1)^2 \quad (4-11)$$

其中，根据极值原理，要使 $F(A, B, C, D, E)$ 最小，则必有：

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \quad (4-12)$$

由此，可到线性方程组：

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^m y_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i^3 \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m y_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m y_i \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

最后利用全主高斯消元法可以解得 A, B, C, D, E 参数值，进而可导出椭圆直角坐标几何参数：中心坐标 (x_o, y_o) ；长半轴 a 和短半轴 b ；长轴旋转角 θ ，如图 4-7 所示。

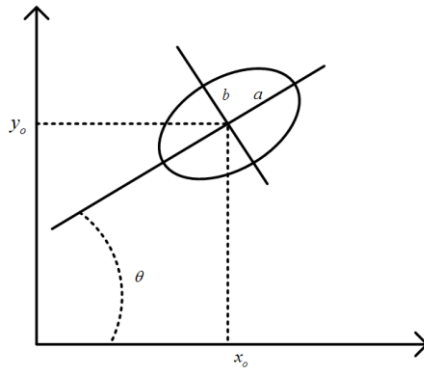


图 4-7 直角坐标参数几何意义

其中，变换表达式如下：

$$\begin{cases} x_o = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_o = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \\ \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A - C} \right) \\ a = \sqrt{\frac{2(Ax_o^2 + Cy_o^2 + Bx_o y_o - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \\ b = \sqrt{\frac{2(Ax_o^2 + Cy_o^2 + Bx_o y_o - 1)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \end{cases} \quad (4-14)$$

在圆钢椭圆拟合过程中，在数据点的选取采取离散模式，并不是把整个圆钢

的数据点作为样本点，而是根据圆钢的大小，轮廓数据上均匀分布采集 30 个轮廓点作为样本点，根据式 (4-13) 和 (4-14) 从而求出圆钢的当前几何参数。如图 4-8 所示为椭圆拟合算法的效果图。

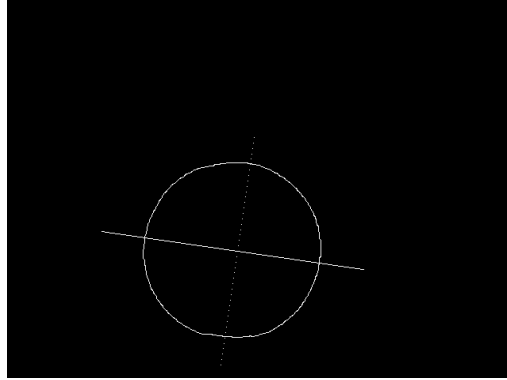


图 4-8 椭圆拟合算法效果图

其中实线为长轴方向，点虚线为短轴方向，几何参数：中心坐标 (x_o, y_o) 为 (290,160)；椭圆的长半轴 $a=112.3$ 和短半轴 $b=110.8$ ；长轴旋转角 $\theta=-8.26^\circ$ 。从而可以计算出圆钢的轮廓尺度参数： $A=22.46\text{mm}$, $B=22.16\text{mm}$, $C=22.35\text{mm}$, $D=22.32\text{mm}$ ，单位像素精度 0.1mm。根据 $\phi 22$ 孔型设计图，钢坯长轴和短轴检测是准确的，长轴方向在辊缝处，短轴在孔型垂线附近，方向存在偏差是由辊缝不完全变形造成的。

4.2.3 六角钢轮廓 Hough 直线检测算法

在经过一系列图像处理算法之后，获得六角钢的完整轮廓图像。对六角钢的轮廓检测算法，并没有什么高效的算法，其中大部分采取直线检测算法，通过检测边长达到检测六角钢的目的。本文采取累积概率 Hough 直线检测作为六角钢的检测算法，通过计算六角钢边长直线，然后求直线相交获取六个交点坐标，并保存起来为下一步计算轮廓参数做好准备。

标准 Hough 变换^[54](SHT)的基本思想就是利用点-线的对偶变换，也就是说在图像空间的一个点对偶到参数空间就是一条曲线，从而通过求参数空间曲线相交峰峰值点就为图像空间的一条直线，如图 4-9 所示为 Hough 直线检测示意图。

对于图像坐标中的某一直线 $y = mx + b$ 可用极坐标表示为：

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4-15)$$

θ 表示直线法线与 x 轴方向的夹角， ρ 为原点到直线的垂线离。通过式 (4-15) 把图像坐标系中一条直线 (x, y) ，映射到了参数坐标中的一个点 (ρ, θ) 。再考虑图

像坐标中某一个点 (x_i, y_i) ，由于过该点直线有无数条，因此在参数平面就会形成一条曲线，对于同一条直线的点来说，那么这些曲线就会相交于一个峰峰值点 (ρ_0, θ_0) 。

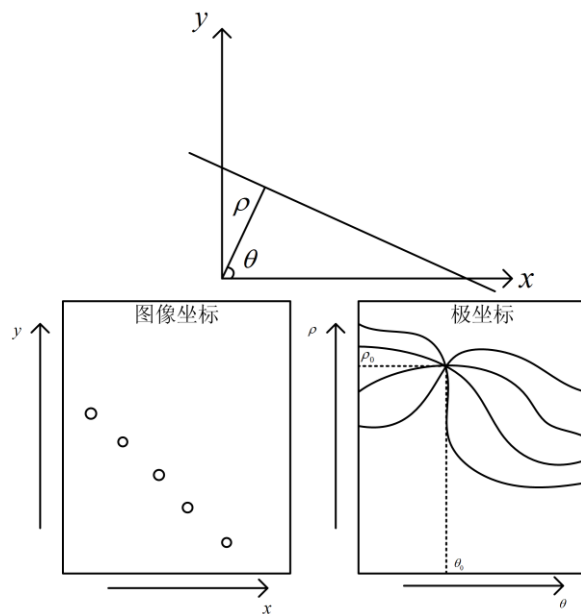


图 4-9 Hough 直线检测示意图

正如上分析所示，标准 Hough 变换不足的就是时间和空间复杂度较高，实时性较差。因此本文选取具有高效，实时的累积概率 Hough 直线检测算法^[55]。累积概率 Hough 直线检测算法采用空间映射和直线检测交替进行的方式，因此无论在空间复杂度还是时间复杂度上都要优于 SHT。算法的具体过程概述如下^[55]：

- 1、建立并初始化一个累加器 $A(\rho, \theta)$ ，将图像空间中检测到的所有目标点放到另一个目标点集合中；
- 2、判断待处理目标点集是否为空，如果是则迭代结束，否则，从目标点集中随机取出一个目标点对偶到参数空间，并把该点从原有目标点集中删除，然后在已有 θ 序列值下，计算相应的 ρ 值，对应的累加器 $A(\rho, \theta)$ 加 1；
- 3、判断更新后的累加器 $A(\rho, \theta)$ 值是否大于阈值 T ，如果是跳转到第 4 步，否则继续执行第 2 步；
- 4、由对偶变换关系可知，对于大于阈值 T 的累加器 $A(\rho_i, \theta_i)$ ，可以确定唯一一条直线 $\rho_i = x \cos \theta_i + y \sin \theta_i$ ，同时，将位于直线上所有目标点从目标点集中剔除，累加器 $A(\rho_i, \theta_i)$ 置零，并跳转至第 2 步。

正如上所述分析，在算法运行过程中一边提取直线，一边剔除直线，同时加之对筛选出的参考直线只保留其两个端点，因此算法的时间和空间效率进一步提

升，如图 4-10 为六角钢边长检测效果图，其中累加器阈值 $T = 30$ 。

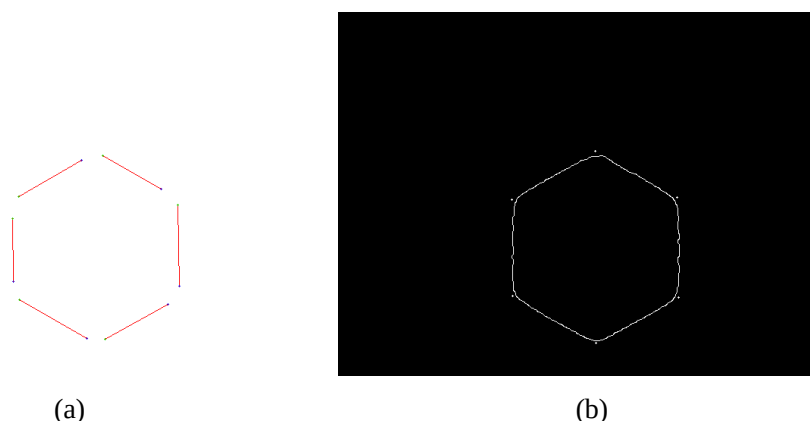


图 4-10 累积概率 Hough 直线检测效果图

(a) Hough 原始检测效果图; (b) 交点检测数据效果图

经过上述处理，为了便于观察对所获取的图像进行反色处理，如 4-10(a)所示，发现一共获得钢坯轮廓边长的 6 条边和 12 个端点轮廓数据，对于计算轮廓边长来说这些数据都有冗余，进一步把检测直线延长计算 6 个交点坐标，如图 4-10(b)所示，十字角点为所检测到的六条边直线相交交点，以图像最下点为起点以顺时针为方向表示六个点坐标为：(340,43)，(230,105)，(229,232)，(339,296)，(447,235)和(449,103)，计算出该六角钢的三个轮廓尺度参数： $A = 22.19\text{mm}$, $B = 22.18\text{mm}$, $C = 22.20\text{mm}$ 。

4.3 轮廓表面缺陷判断图像处理算法研究

表面缺陷种类有很多，根据各走向和位置不同分为：线状缺陷、块状缺陷、星状裂纹等，但是缺陷的成因大致相同，都是由于在轧制过程中，由于轧辊或钢坯内部质量问题，在钢坯表面形成了凹陷或凸出的表面缺陷。表面缺陷的判断是各大钢企生产关心的重点，有些表面缺陷细小，而且分散的特点，容易造成大量次品的出现，因此对钢坯表面缺陷无损检测也就成为了研究热点。

在钢坯表面缺陷传统无损检验方法，在现有技术背景下，根据各自检测的原理不同主要分为：涡流检测技术、漏磁检测技术、红外检测技术和机器视觉检测技术。无论涡流，漏磁，还是红外检测技术，这类检测方法都是利用钢坯表面缺陷的电磁物理特性进行检测。涡流检测技术利用钢坯表面缺陷和周围钢坯居里点不同进行检测，这种检测方法只能适用于慢速和大裂纹的检测；漏磁检测技术利用磁场中的磁通不通过预先设定路径的部分的密度与裂纹的体积成正比例关系进行检测，该类检测方法检测灵敏，而且快速，但是他不能对体积分布不均均为钢

坯进行检测；红外检测技术利用电磁感应对钢坯表面进行加热，如果有裂纹存在该区域的电流路径延长，电阻增大从而相对于周围钢坯表面温度升高，再利用红外像机进行识别从而达到检测裂纹目的，该类方法检测效果一般，而且需要消耗大量的电能。基于机器视觉检测方法是近三十多年发展起来的，特别是 CCD 和 CMOS 生产技术和机器视觉理论的而不断发展，为机器视觉表面缺陷判断奠定了良好的基础。机器视觉技术拥有通用、可重复、无人工接触式、抗电磁干扰等特点，将机器视觉技术运用到钢坯表面缺陷识别系统中，可以极大地提高生产制造过程的自动化和机器化水平。

4.3.1 钢坯表面缺陷判断基础

本文提出了一种机器视觉被动式表面缺陷判断方法，当在测量系统完成钢坯轮廓图像计算之后，通过向激光调制器发出指令关闭激光器，此时控制摄像机获取一帧钢坯表面灰度图像，该帧图像包括了钢坯表面所有的灰度信息。该算法提出主要针对特种钢表面缺陷进行判断，所谓的特种钢主要是指在钢坯生产过程中加入了适量的合金元素，贵钢生产的特种钢主要分为中空钢和型钢，中空钢主要用于钻井、矿产等产业，具有高强度，耐磨和耐腐蚀等特性；型钢主要用于车床加工、汽车等产业，具有高强度，高韧性，耐磨等优良特性。

中空钢生产过程中，主要是使用两种不同膨胀率系数的两种钢坯，由于钢坯材料本身的耐腐蚀性，因此在轧制过程中，中空钢本身的氧化铁皮较少，而型钢在耐腐蚀性上稍差，因此在高温轧制过程中铁销较多，如图 4-11 所示。

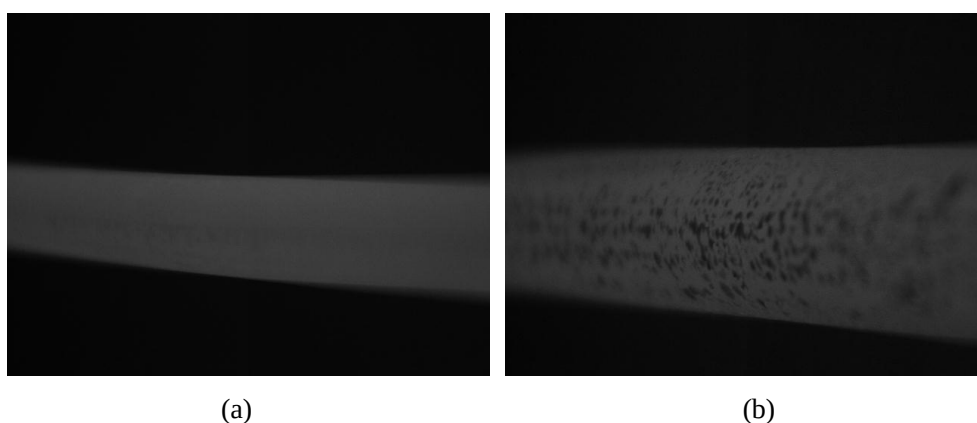


图 4-11 中空钢和型钢表面灰度图

(a) 中空钢表面灰度图；(b) 型钢表面灰度图

由于钢坯，铁销和表面缺陷表面特性和温度的不同，它们所发出的红外光强度和光谱上都有所变化。铁销由于本身附着在钢坯表面，温度相对于钢坯本身较

低，因此在红外光辐射强度上较弱。钢坯由于体积较大，而且在锻造过程中，钢坯本身温度会有所上升，因此钢坯表面辐射红外光较强。缺陷主要是在钢坯锻造或钢坯本身内部质量问题，在表面形成点状、线状和块状的划伤，这种缺陷将极大的影响钢坯的使用寿命，如图 4-12 所示，由于钢坯内部温度相对于表面温度更高，因此缺陷的辐射红外光相对于钢坯表面来说更强。利用红外像机把钢坯散发的红外光谱特性反映到人眼可见的图像上，由于各自散发的光强不一样，因此在图像的灰度上会有所异样，利用这一特点判断裂纹是否存在。

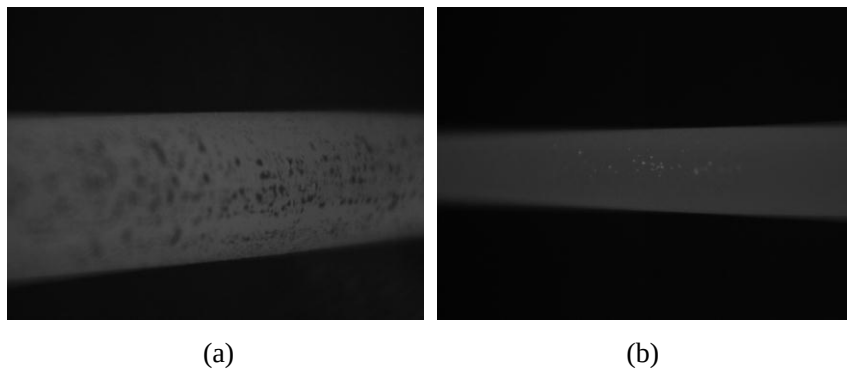


图 4-12 钢坯表面缺陷示意图

4.3.2 钢坯图像区域提取

图像提取的目的主要是从钢坯灰度图像中，锁定高温钢坯所在的图像坐标区域。在轧钢过程中，高温钢坯是不断跳动的，钢坯每次所处图像的区域是不固定的，因此必须在算法处理前，提取出钢坯所在的坐标区域进行锁定，然后对钢坯锁定区域做运算。

由于整个测量系统是处于一个封闭的环境中，隔绝了有可能的环境光造成的图像质量影响，因此在摄像机拍摄过程中可以保证无背景光干扰，而 CCD 的内部干扰信号不可避免的存在，但是相对于钢坯散发的红外光强响应相比可以忽略不计。根据上述特点，利用离散差分的公式(纵向差分，步长 5)，分别从图像的四个点(左上角、左下角、右上角、右下角)开始依次向中间靠拢，当图像灰度离散差分值达到一定数量级 $\Delta=10$ ，就可以锁定钢坯所在图像区域的一个顶角位置。如图 4-13 所示为锁定区域算法识别效果图，为了方便识别把检测到四个顶角锁定区域进行二值化。



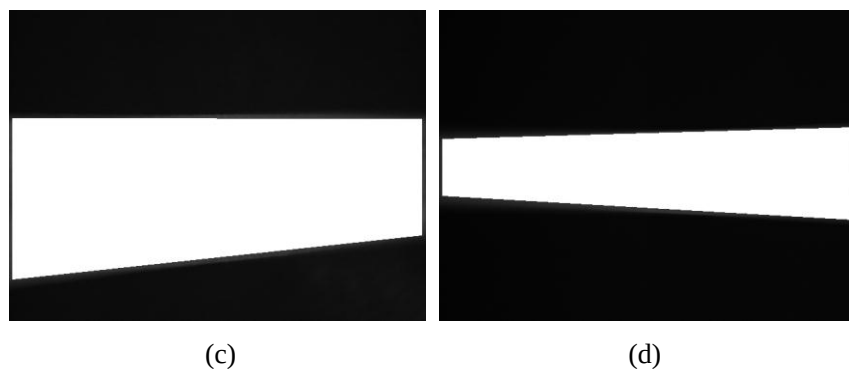


图 4-13 钢坯锁定区域算法效果图

(a) 型钢灰度图；(b) 中空钢灰度图(含缺陷)；(c) 型钢锁定区域效果图；(d) 中空钢锁定区域效果图

4.3.3 钢坯区域图像特征提取

图像的特征提取主要完成对钢坯锁定区域内的铁销层的提取和锁定工作，主要步骤包括区域直方图统计、分割阈值选取和铁销图像的膨胀处理。在整个钢坯锻造过程中，氧化铁皮的影响总是存在的，不仅对钢坯生产工艺产生影响，而且容易对裂纹的判断产生误判，因此在决策之前，必须锁定出那些铁销在图像中的所在位置。

1、区域直方图统计

区域直方图统计主要是统计锁定区域内，图像灰度的分布情况，并把钢坯本身灰度层给提取出来。灰度直方图虽然不能给定某一个灰度所在的图像区域，但是它能够提供灰度统计信息，为后期分割阈值选取打好基础。

设经离散数字离散后，图像的大小为 M 行 N 列，图像中选取不同的灰度点，它的像素点数目是不一样的，那么某一个灰度级 r_i 的概率密度函数表示为：

$$p(r_i) = \frac{\text{Num}(r_i)}{M \times N} \quad (4-16)$$

上述表达式就称为灰度直方图统计，且有：

$$\sum_{i=0}^{255} p(r_i) = 1 \quad (4-17)$$

如图 4-14 所示表示对图 4-13 锁定钢坯区域灰度直方图统计，发现在灰度直方图统计只存在一个峰峰值点。

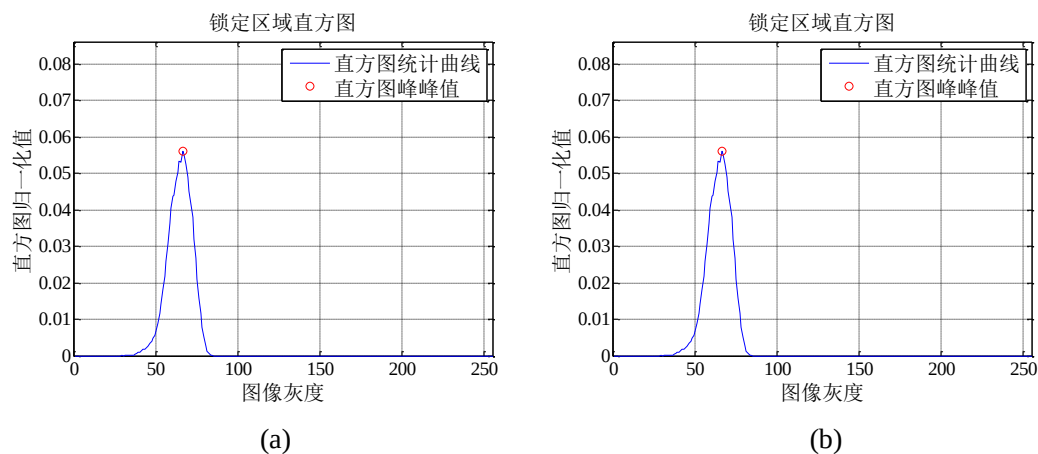


图 4-14 区域直方图统计示意图

(a) 型钢锁定区域直方图；(b) 中空钢锁定区域直方图

2、区域分割阈值选取

分割阈值选取是图像的特征提取的最为关键的一步，如果分割阈值选取过大，则有可能对裂纹判断产生漏判，如果分割阈值选取过小，则有可能对裂纹判断产生误判，把不是裂纹的铁销当成裂纹处理。由于铁销相对于钢坯的面积较小，而且也是附着在钢坯表面，铁销边缘散发的光强跟裂纹表面相近，铁销中心与钢坯散发光强差异较大。而钢坯内部温度要比表面高很多，因此裂纹在散发光强上要远远大于钢坯本身的光强。

根据铁销、钢坯和裂纹三者散发的光强特性出发，可以得出如下结论，区域统计直方图的峰峰值灰度层 P 表示的钢坯层本身，如图 4-14 所示，其中，当灰度小 $T = P - 10$ (边缘检测算子决定) 表示的是较暗铁销中心所在的灰度层，对于大于 P 的灰度表示裂纹可能存在的灰度层。

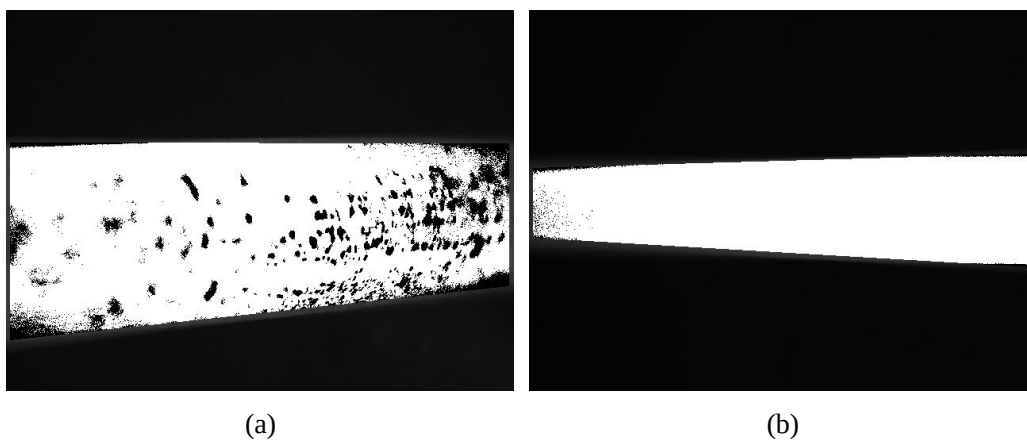


图 4-15 锁定钢坯区铁销层分割示意图

(a) 型钢阈值分割铁销层；(b) 中空钢阈值分割铁销层

根据上述特性,采用图 4-14 获得 $T = P - 10$ 铁销分割阈值,利用式 4-2 对图 4-13 锁定钢坯区域图像进行分割。如图 4-15 所示表示采用阈值分割阈值 T 处理效果图,其中黑色层表示较暗的铁销中心层。

3、铁销图像的膨胀

经过上述处理后,获得铁销层的分布图像,由于铁销层本身散发光强的特点,并没有涵盖铁销的边缘,当在图像裂纹决策的时候,这些边缘和边界的灰度差,还是会对裂纹的决策产生误判,因此在获得铁销分布层图像后,还要采用膨胀处理把整个铁销边缘涵盖进来。

图像膨胀^[34]是一种数学形态学处理方法,以图像的基本特征和基本结构为研究对象,定义如下所示:

$$D(A) = \{z | B_z \cap A \subseteq A\} = A \oplus B \quad (4-18)$$

其中, B_z 表示结构元素 B 平移 z 后获得新的集合,把满足式 4-18 而生成的新的集合 $D(A)$ 称为 A 被 B 膨胀的结果,如图 4-16 所示:

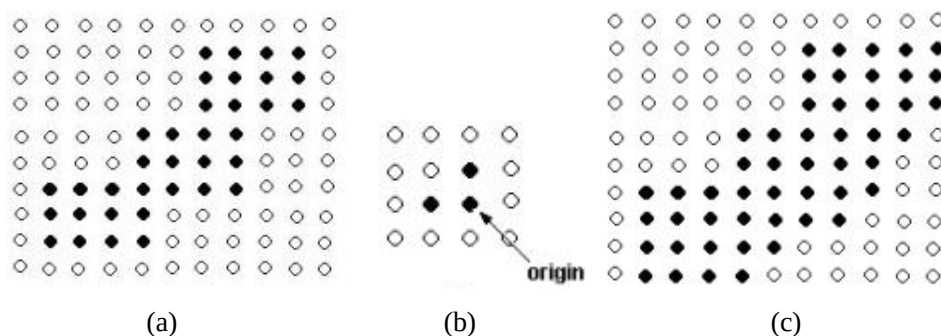


图 4-16 膨胀操作示意图

(a) 结构元素 B ; (b) 集合 A ; (c) $A \oplus B$

本文采取 3×3 的结构元素 B :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

如 4-17 所示表示对图 4-15 结果进行膨胀处理的效果图,发现经过膨胀处理从而把铁销边缘层也包裹进去。

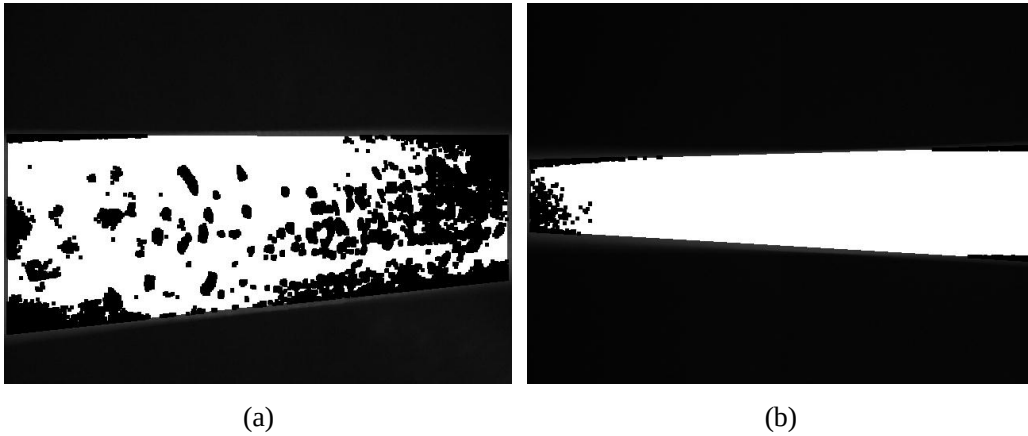


图 4-17 钢坯锁定区域铁销层膨胀效果图

(a) 型钢铁销层膨胀；(b) 中空钢铁销层膨胀

4.3.4 钢坯表面缺陷决策判断

决策的判断主要是对锁定区域内的图像做图像运算，并判断是否存在裂纹。经过上述的处理，已经把铁销的区域和分布层标示出来，图像中就剩下了钢坯本身灰度层和裂纹灰度层。根据被动式机器视觉测量原理可知，如果钢坯表面存在缺陷的，那个该区域温度就会异常变化，反应的图像中就是图像灰度发生相应变化。因此本文采用 Soble 算子作为裂纹检测的基本算法，可以检测出裂纹所在的区域和外围像素周长，对于裂纹的类型和面积等参数需要线下处理。

Soble 算子^[34]是一种离散一阶微分梯度算子，它是根据一阶离散微分演化而来。该算子是由两个 3×3 模板组成，分别横向和纵向微分，将它用于平面卷积过程，便可求得各自方向的微分 G_x 和 G_y 的值，如下所示：

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{and} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \quad (4-20)$$

其中， A 表示卷积图像，进一步计算得到该点梯度值 ∇ ：

$$\nabla = |G_x| + |G_y| \quad (4-21)$$

对于图像来说，任何一个位置使用 Soble 算子都会得到一个梯度值，因此在图像表面缺陷判断时，首先采取表面铁销层作为先决条件，只有目标点不处在铁销区域才做 Soble 卷积运算，然后对计算出的 Soble 梯度 ∇ 做判断，只有当 ∇ 大于给定的梯度阈值 ∇_T 才将该像素点作为疑似裂纹点，最后对裂纹边界连通域和周长做计算，当达到一定数量级之后才作为疑似裂纹区域，把图像所在区域显示，并保存图像，为进一步分析做好准备。

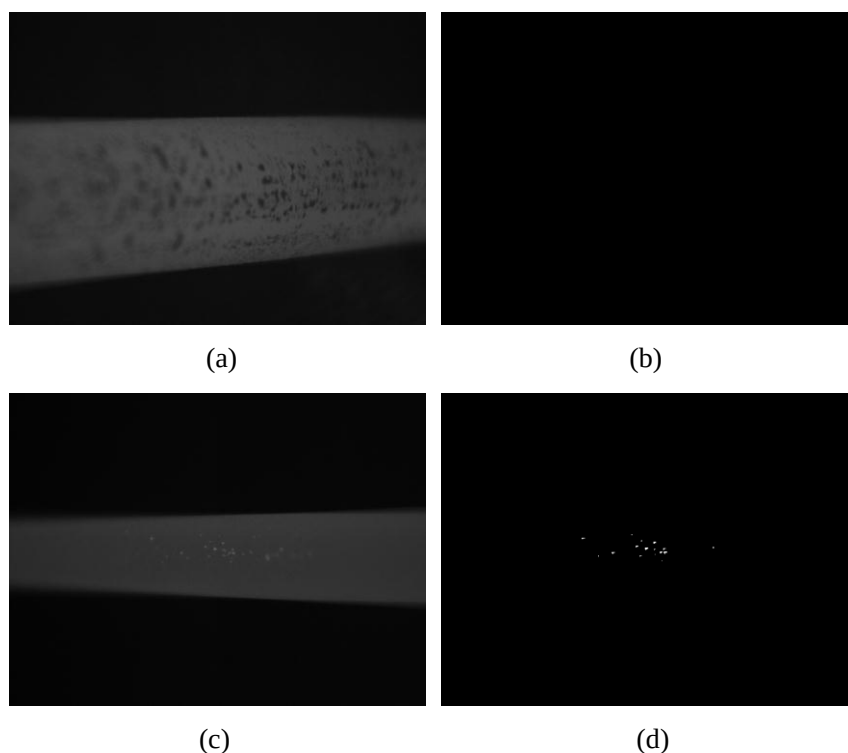


图 4-18 钢坯锁定区域缺陷识别示意图

(a) 型钢表面灰度图; (b) 型钢表面缺陷判断结果; (c) 中空钢表面灰度图; (d) 中空钢表面缺陷判断结果

如图 4-18 所示为 Sobel 算子表面缺陷判断结果，其中采取图 4-17 结果为先决条件，发现该算法能够有效地检测出图像中的缺陷，如图 4-18(d)所示，亮斑表示星状裂纹，而铁销等这些干扰因素能够很好的剔除，如图 4-18(b)所示。

4.4 本章小结

本章从钢坯图像处理算法出发，对于轮廓检测算法，主要介绍了图像的基本预处理，结合 Zhang 快速细化算法完成图像单像素轮廓提取，针对双目测量系统视场不足的问题，提出了二次 NURBS 算法完成了曲线连接，根据圆钢和六角钢轮廓测量特点，提出了基于最小二乘法的椭圆拟合和概率 Hough 直线检测算法，并给出实验测量结果。另外根据钢坯检测类型的特点，详细介绍了基于 Sobel 检测算子的表面缺陷判断算法，最后给出实验结果验证了算法的高效性。

第五章 系统现场测量结果及其分析

通过前面章节的分析及实验，对于高温钢坯机器视觉在线检测系统所要遇到的各种问题进行分析，针对这些问题提出各自的解决办法。如在钢坯轮廓图像的获取，采取锁定成像技术从而达到了滤除背景光，提取轮廓断面光带的目的；针对检测钢坯轮廓大小的不同和光带灰度的变化问题，提出了动态的 OTSU 二值化方法；在图像标定还原融合后轮廓尺度存在偏差的问题，提出了线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法；在钢坯表面缺陷判断时，针对钢坯表面铁销层的影响，提出了基于直方图统计动态阈值的分割算法。

通过多次的现场实验，对系统的软件和硬件进行多次修改。目前，该测量系统已经能够稳定运行，并取得很好地测量效果。

5.1 测量系统框架结构及其硬件

根据第二章介绍的系统结构设计示意图，按照系统设计要求和生产及加工相应的系统框架和配套摄像机和激光器固定设施，如图 5-1 所示为根据图 2-3 生产和加工出来的框架实物图。



图 5-1 系统框架结构实物图

(a) 框架斜视图；(b) 适配器安装盒

测量系统的硬件主要包括：

- ◆ 额定电压为 5V 功率为 1.5W 的波长为 808nm 的西安雷泽公司生产的线性激光器及其调制器。
- ◆ 韩国 Vieworks.Co.Ltd 生产的最高帧频为 256 的 VH-310G-M264A0 的 CMOS 像机及其千兆网线、交换机。

- ◆ 成都英特罗克公司加工和生产的框架结构及水冷套装。
- ◆ 联想公司生产的 T4900V intel i7 四核八线程商用台式机。
- ◆ 测量系统标定时需要的定标板及其固定支架。

首先根据系统组装结构图,完成系统的装配,如图 5-1(a)为装配完成的框架图,由于整个系统在下线之后需要能够保护性的存放,因此在设计的时候系统的每一个模块单元都是可以拆卸的。然后把标定板通过支架固定在前面板上,完成摄像机的标定,如图 3-3 节所阐述的一样,把标定参数通过二进制文件输入到测量系统中,如表 3-1,表 3-2 和表 3-3 所示。最后把整个测量系统按照到生产线,再通过控制线和千兆网线与 PC 进行连接,如图 5-2 所示为测量系统现场运行实物图,测量系统所处的位置为剪辑之后和轧机之前一段。



图 5-2 测量系统现场运行图

5.2 软件系统介绍

高温钢坯机器视觉在线检测系统主要针对现场测量,对于测量系统使用用户就是生产的一线工人,因此测量软件的开发设计基本上原则:程序界面简单,易操作。

5.2.1 软件需求分析

系统软件设计是在基于 Microsoft Visual C++ 6.0 平台上,采取 MFC(Microsoft Foundation Classes)为基本结构框架完成程序开发,MFC 是 Microsoft 公司运用面向对象编程技术封装了 Windows API 结构的 C++类库。MFC 提供了文档-视图体系开发结构,这种体系结构通过文档类对象来存储、管理以及处理数据,然后使用视图类来对数据进行显示。文档-视图框架结构使得数据的管理和显示相对独立开来,形成高度的模块化作业,不仅提高了工作效率而且在开发过程中可以很好的对数据进行维护。

对于一个完整的应用程序开发来说，对软件做一个功能需求分析是必不可少。在高温钢坯机器视觉在线检测系统软件设计中，其主要实现功能如下：

- 1) 在程序运行之前必须完成一些初试化工作，如摄像机打开和设置，标定参数读取，基本信息参数输入。
- 2) 完成软件算法并行开发，提高运行速度，尽可能满足生产要求。
- 3) 需告知用户系统当前测量状态，如遇到参数异常，声控报警提示。
- 4) 实时显示当前所采集到的钢坯轮廓和表面缺陷图像功能。
- 5) 通过波形显示，直观的查看当前轮廓尺度参数变化曲线。
- 6) 根据用户要求可以随时修改当前检测钢坯型号功能。

5.2.2 软件框架设计

基于上述软件功能分析，测量软件主要完成一些交互功能设计和图像处理算法开发工作，因此采用 MFC 文档-视图类结构下的单文档框架结构可以完成系统设计开发，如图 5-3 所示为整个测量系统框架类设计关系结构图。

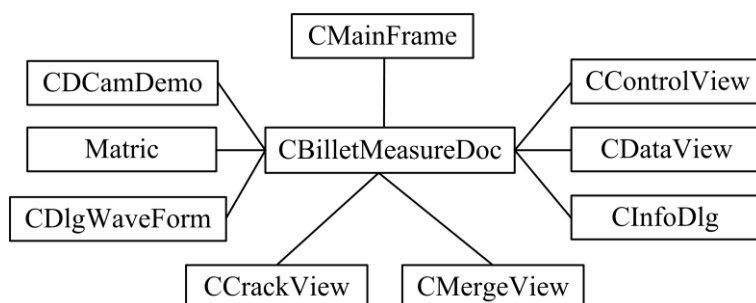


图 5-3 类的结构关系示意图

软件系统的视图类主要包括：CMergeView，CCrackView，CControlView，CDataView，CDlgWaveForm 和 CInfoDlg。CMergeView 类主要用于显示钢坯轮廓图像；CCrackView 类主要用于显示表面缺陷图像；CControlView 为控制功能按钮界面显示视图类，包括程序的启动，钢坯类型的选择；CDataView 为测量轮廓参数界面显示视图类，包括轮廓参数和裂纹周长后期计算和显示工作；CDlgWaveForm 为波形显示视图类，主要把轮廓尺度参数以直观的波形数据显示出来；CInfoDlg 为输入信息界面视图类，主要获取当前检测钢坯的尺寸信息。CBilletMeasureDoc 为软件系统的文档类，为程序主类：软件系统的数据管理，多线程的实现，数据的相互交换，算法设计和实现。Matric 为一个矩阵算法类，主要完成矩阵的基本数学运算。

CMainFrame 类为程序主框架类，主要完成程序界面窗口分割，对于一个框架

四个视图类的设计，采用 MFC 封装的 CSplitterWnd 类完成，通过定义三个对象，两次分割从而完成交互界面设计。

5.2.3 软件流程图设计

根据程序功能需求分析和软件框架设计，软件设计流程图设计如下图 5-4 所示：

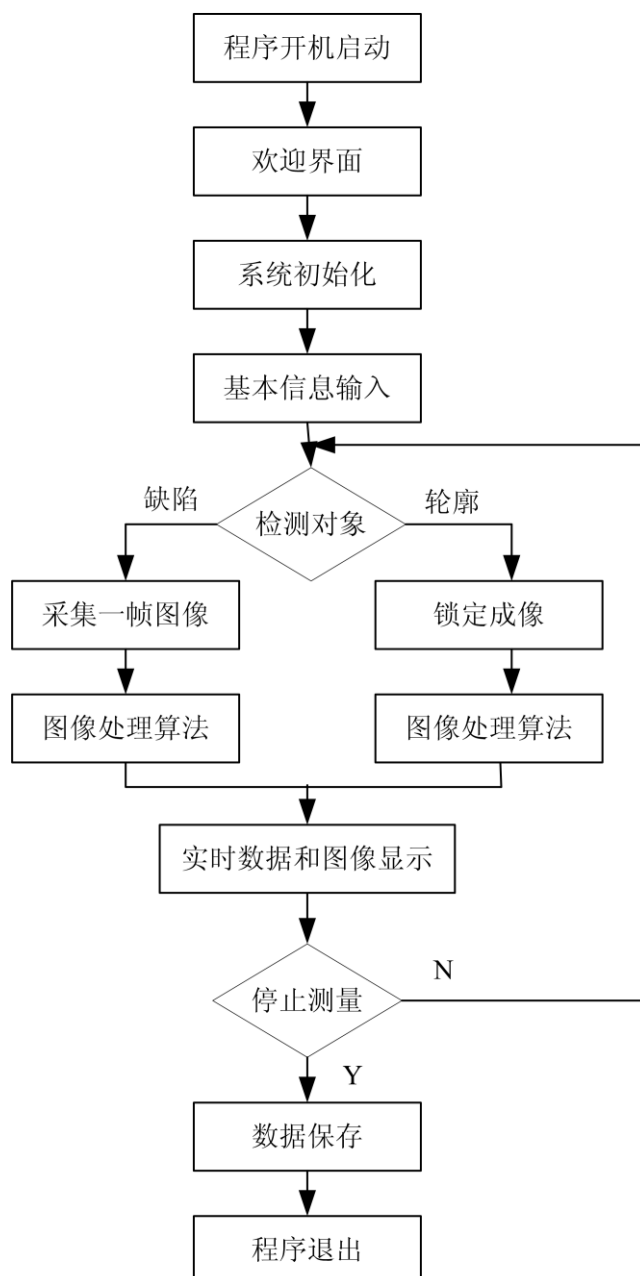


图 5-4 测量软件程序流程图

程序点击启动后，进入欢迎界面，短暂停留后，完成软件系统初始化和基本

参数读取，再跳转到基本信息设置对话框，输入一些基本检测对象参数确定之后，最后跳转到软件运行主界面。

测量软件主要完成两项工作：钢坯轮廓参数的计算和表面缺陷的识别。在程序运行之后，会根据要求来自动识别当前需要进行哪项测量工作，并把图像处理获取的数据实时显示出来，测试完毕后，停止采集图像，将测量数据保存，并退出程序。

5.2.4 软件操作界面介绍

测量系统的界面主要分为四个部分，包括系统欢迎界面、基本信息输入对话框、现场测试界面和波形显示界面。在双击启动测量软件之后，图 5-5 所示的首先弹窗欢迎界面，系统暂停 3 秒。在暂停时间里测量软件完成标定参数读取，激光器调制器的和摄像机的初始化，然后进入输入信息对话框，如图 5-6 所示为基本信息输入对话框，其是 CInfoDlg 类的实例对象。

基本信息对话框主要包括：钢型的选择，精度范围，椭圆度公差百分比。钢型的选择主要是输入当前检测钢坯的尺寸信息；精度范围主要指的是当前检测钢坯的误差精度；椭圆度公差主要是针对圆钢才有的测量参数，椭圆度公差指的是截面最大直径和最小直径之差乘以公差百分比。



图 5-5 测量系统欢迎界面(首钢商标)



图 5-6 输入信息对话框

钢坯基本输入信息确定之后，CInfoDlg 实例对象通过消息响应调用 OnOK() 函数把输入信息传递到 CBilletMeasureDoc 实例对象当中管理，程序代码如下所示：

```
// 波形显示对象，由 CBilletMeasureDoc 管理。
m_DlgWaveForm.m_BilletDiam = m_InfoDlg.m_iDiaCircle;
m_DlgWaveForm.m_ScaleError = m_InfoDlg.m_fError;
m_DlgWaveForm.m_fCirCoe = m_InfoDlg.m_fCirCoe;
// 视图类对象，完成最后轮廓尺度参数计算。
((CDataView*)GetDataView())->m_iBilletDiam = m_InfoDlg.m_iDiaCircle;
((CDataView*)GetDataView())->m_fCirCoe = m_InfoDlg.m_fCirCoe;
```

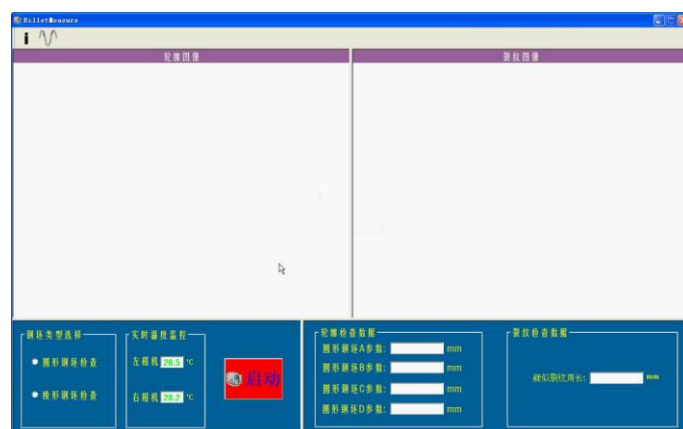


图 5-7 测量软件程序主界面

钢坯基本输入信息确定之后，进入测量软件主界面，如图 5-7 所示。测量软件程序主界面主要包括四个子窗口和一个工具栏组成。左上角子窗口为显示当前钢坯的轮廓位置和形状，并把拟合的钢坯形状以红色形式显示处理；右上角窗口为显示左、右钢坯疑似表面缺陷图像显示出来；右下角子窗口为测量软件自动运行后实时的把钢坯轮廓尺度参数和疑似裂纹周长显示处理。

左下角子窗口主要完成软件启动功能，当输入信息确定之后可以，先在钢坯类型选择单选框中选择当前测量钢坯类型，然后单击启动按钮测量软件通过消息响应自动启动多线程，开启并行测量，并实时返回测量信息，代码如下所示。

```
HANDLE m_handle = CreateThread(NULL,NULL,CBilletMeasureDoc::
ImageCircleProcL,m_pDoc, NULL,NULL);
HANDLE m_Handle = CreateThread(NULL,NULL,CBilletMeasureDoc::
ImageCrackProcL,m_pDoc, NULL,NULL);
CloseHandle(m_handle);
CloseHandle (m_Handle);
```

当测量系统运行时，摄像机的温度也会进行实时的监控，当摄像机温度超过工作温度 48° 时，系统会通过声控报警提醒生产工人，代码如下所示：

```
::PlaySound("alarm.WAV",NULL,SND_FILENAME|SND_ASYNC|
SND_LOOP);
AfxMessageBox("像机环境温度超标，请加大水流量，注意通风！",
MB_OK|MB_ICONSTOP);
::PlaySound(NULL, NULL, SND_FILENAME | SND_ASYNC | SND_LOOP);
```

顶栏为软件系统工具栏，其中单击 i 型按钮会弹出输入信息对话框，为根据现场测量实时调整输入信息，单击波浪形按钮就会弹出波形显示窗口，并把当前钢

坏数据以更为直观的波形显示出来。如图 5-8(b)为波形显示界面，根据测量要求分为圆钢参数波形和六角钢参数波形。

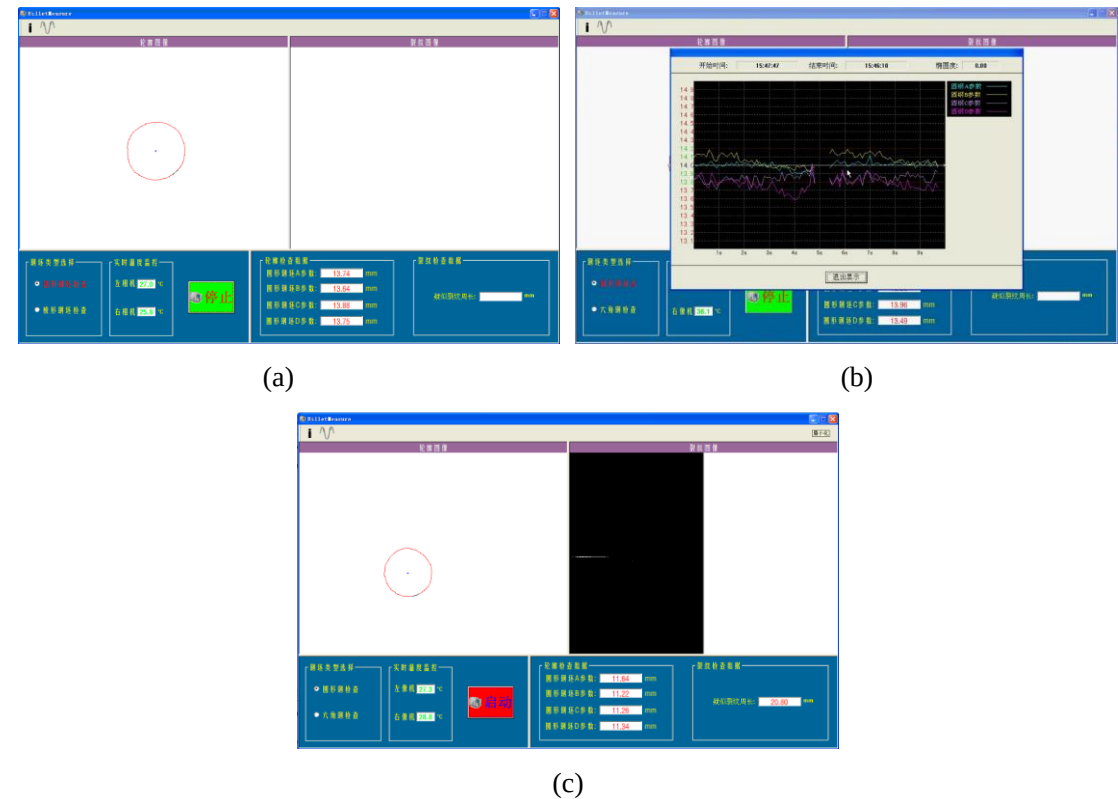


图 5-8 测量软件各种运行情况下显示界面

(a) 测量软件自动测量主界面；(b) 测量软件启动波形显示；
(c) 测量软件表面缺陷显示界面

5.2.5 软件操作注意事项

在系统组装完成后，先要启动附带检测软件，检验摄像机通信千兆网线和激光器控制器连接控制线是否正常。再启动测量软件，待软件进入图 5-6 后查看参数对照表，确定无误后在点击确定按钮。测量过程中如遇钢坯参数调整，请先暂停测量程序，再点击工具栏相应按钮，否则无法操作输入信息对话框。

如遇测量系统异常，请先关闭测量软件，关闭激光器和摄像机电源。待生产线暂停之后，做好相应的安全措施，在生产工人的陪同下检查现场设备。

5.3 系统测量实验及其结果

根据项目合作需求，先后三次到贵钢第三轧钢厂中空钢型钢作业部完了高温钢坯机器视觉在线检测系统相关现场实验测量研究工作，每次实验时间长达半月

之久。根据最近一次现场实验，测量系统已经能够初步完成钢坯轮廓尺度测量和表面缺陷的判断。

5.3.1 实验室环境下测量数据

在实验室环境下，主要使用的是贵钢生产的圆钢和六角钢样品为检测对象，如图 5-9 所示，从左至右的钢坯型号： $\phi 14$, $\phi 22$, $H22$, $\phi 40$ 。根据不同的钢型，检测出相应的轮廓尺度参数和表面缺陷判断，如表 5-1 为在实验室静态试验条件下，采取多次测量方法。



图 5-9 实验室环境下检测钢坯样品

表 5-1 测量系统静态实验数据对比表(mm)

规格 尺寸	精确游标卡尺				测量系统			
	A	B	C	D	A	B	C	D
$\phi 14$	14.30	13.90	14.26	14.22	14.18	13.72	14.01	14.03
					14.14	13.78	14.10	14.10
					14.24	13.81	14.07	14.01
$\phi 22$	22.66	22.46	22.56	22.56	22.45	22.20	22.39	22.40
					22.40	22.17	22.43	22.34
					22.36	22.18	22.35	22.28
$\phi 40$	40.36	40.10	40.04	40.10	40.41	40.30	40.24	40.28
					40.50	40.23	40.34	40.40
					40.57	40.34	40.35	40.42
$H22$	22.36	22.34	22.32	无	22.15	22.12	22.10	无
					22.21	22.17	22.18	无
					22.10	22.20	22.17	无

根据表 5-1 的实验结果可知,对于不同的钢坯型号尺寸在实验室静态环境下都能获得良好的效果,相比于精确游标卡尺测量结果精度误差在 $\pm 0.20\text{mm}$ 。

为了验证钢坯表面缺陷判断算法的准确性,通过高温乙炔焊机对拥有表面缺陷的 $\phi 40$ 圆钢进行高温加热模拟热轧圆钢棒线现场生产情况,如图 5-10 所示为检测效果示意图。

根据测量系统在实验室环境下运行结果,验证了测量系统的稳定性和准确性。

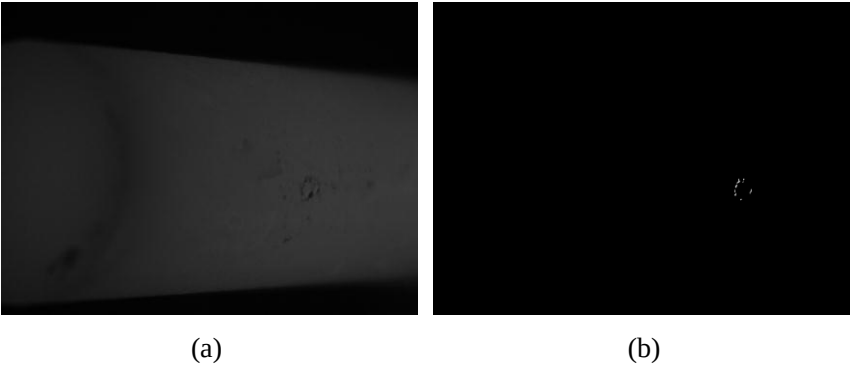


图 5-10 实验室模拟高温钢坯表面缺陷判断示意图

(a) $\phi 40$ 加热红钢示意图; (b) 测量软件表面缺陷判别效果图

表 5-2 测量系统现场测量实验数据对比表(mm)

规格 尺寸	生产班抽样样本				测量系统				公差
	A	B	C	D	A	B	C	D	$\pm\Delta$
$\phi 12$	12.23	12.18	12.19	12.23	12.50	12.42	12.44	12.45	-0.1~+0.4
					12.54	12.44	12.47	12.42	
$\phi 14$	14.19	14.08	14.10	14.10	14.39	14.28	14.30	14.37	-0.2~+0.2
					14.38	14.24	14.34	14.36	
$\phi 22$	22.45	22.34	22.38	22.39	22.19	22.12	22.17	22.24	0.0~+0.6
					22.24	22.22	22.24	22.27	
$\phi 25$	24.82	24.61	24.73	24.74	24.40	24.37	24.42	24.39	-0.6~0.0
					24.52	24.40	24.47	24.41	
$\phi 30$	30.42	30.26	30.33	30.35	30.72	30.52	30.63	30.68	-0.4~0.4
					30.68	30.50	30.55	30.61	
H22	22.25	22.23	22.26	无	22.52	22.48	22.49	无	0.0~+0.5
					22.50	22.47	22.46	无	

5.3.2 贵钢现场测量数据

在钢坯轧制过程中，根据客户的尺度规格要求，自动生成公差尺度控制范围，以 $\phi 22$ 圆钢为例，如果用户需要 22.2mm 的圆钢，那么热轧圆钢的公差控制范围： $+0.2\sim+0.6\text{mm}$ 。在测量系统运行过程中，为了使轮廓测量和表面缺陷能够取得更好地效果，在热轧钢进入测量系统之前，通过压缩空气鼓风机向高温钢坯吹起，已达到去除表面铁销和水汽的影响。

由于测量系统是现场实时测量，测量钢坯数据无法精确到哪一根钢坯的精确位置，因此在数据对比上采用当批号生产班的质量抽样检验数据为准，如表 5-2 所以为最近一次现场测量实验数据。如图 5-11 表示测量系统运行过程中，识别到的钢坯表面缺陷，只是选出几幅具有代表性图像出来。

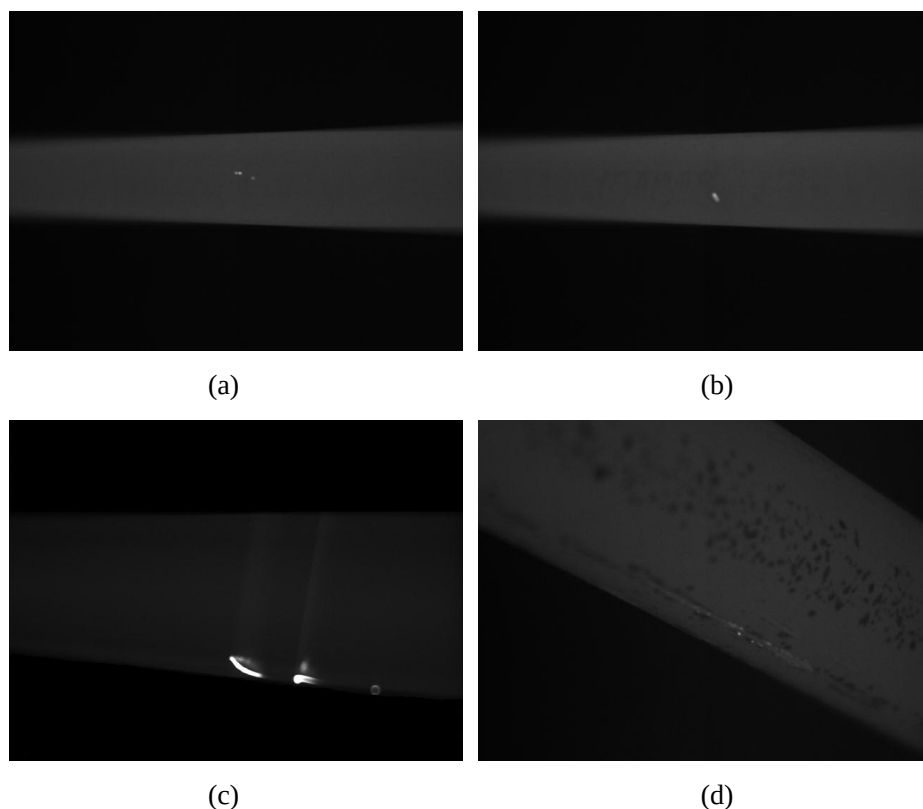


图 5-11 测量系统现场表面缺陷判断结果图

(a) $\phi 14$ 检测到的表面星状缺陷；(b) $\phi 12$ 检测到达的点状表面缺陷；(c) H22 检测到的表面划痕缺陷；(d) $\phi 32$ 检测到的划痕缺陷

经过上述两个实验，虽然在轮廓测量误差精度相对静态实验室上有所下降在 $\pm 0.30\text{mm}$ 左右，还是能够达到轮廓尺度精度误差要求；特别是裂纹表面缺陷的判断在整个测量中，出现错判的概率极小，只有零星几幅图像错判，进一步验证了

系统的稳定性和准确性。

5.4 本章小结

本章从介绍系统框架结构及其硬件安装方法出发，介绍了测量软件的基本结构和软件操作方法，总结了测量系统运行工程需要注意的问题，最后根据测量系统实验室和现场测量数据及其结果。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

随着我国经济的不断发展，对于钢铁的需求越来越大，不仅对钢铁的产品本身物理特性要求苛刻，而且对于钢铁产品的生产质量检测手段也要求更加智能化和精确化。基于机器视觉轮廓测量系统的非接触式，在线测量，高精度，抗干扰等特性也得到相关钢铁企业的重视。本文研究了基于线结构光多传感器钢坯测量系统开发，相对于国外同类型产品不仅能够完成钢坯轮廓尺度测量，而且能够完成表面缺陷判断。

在测量系统研发过程中，主要做的工作如下：

1、提出了基于锁定成像技术的光带提取算法。利用该算法不仅能够滤除背景光和暗点流的影响，更为重要的是能够把钢坯本身散发个红光滤除。

2、根据钢坯轮廓测量的要求，提出了基于双目对称线结构光测量系统框架结构设计，不仅克服了单目测量系统的视场不足，而且能够同时满足钢坯表面缺陷判断的全覆盖要求，提高系统的可靠性。

3、从单目线结构光测量系统标定出发，提出了线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法，该摄像机标定方法不仅标定简单只需一幅图像，而且系统标定速度大大加快，有效的降低了标定成本。根据单像素轮廓面与标定面不重合的问题，做出了理论数学分析过程，根据问题数学描述，提出了快速、有效的误差校正方法。

4、根据测量系统的两个不同任务，提出了各自不同的图像处理算法策略。根据圆钢轮廓测量参数特点，提出了基于椭圆拟合的尺度参数测量算法；根据六角钢轮廓尺度参数特点，提出了基于累积概率 Hough 直线检测算法的尺度参数测量算法。根据钢坯表面缺陷的特点，提出了基于钢坯锁定区域直方图统计自动阈值图像分割算法和 Sobel 算子表面缺陷决策算法。

5、根据实验室静态测量实验和多次反复现场测量实验进一步验证测量系统的稳定性和精确性，并根据每次现场测量经验对测量软件和系统进行优化。

6.2 后续工作展望

本课题研究的高温钢坯机器视觉在线检测系统已经完成系统框架结构设计和软件算法设计，测量系统已经基本能够完成轧钢生产线对圆钢和六角钢的轮廓尺度测量和表面缺陷判断的要求。在后期系统投入运行和生产过程中，还需要在以

下几个方面不断研究和改进：

1、对测量软件界面进一步完善，通过大量的用户体验增加界面功能，使测量软件界面更加人性化，实用和易操作。

2、对于系统框架的设计进一步完善，设计独立轨道固定的框架系统，使测量系统成为一个独立模块，隔绝轧钢生产线的抖动。

3、完成三目摄像机标定方法研究，采用 360° 轮廓测量方法，进一步提高系统测量精度。

4、开发数据配套软件，通过数据保存和再读取过程，让生产工人能够随时查看过往的钢坯测量数据。

致 谢

首先要感谢我的导师余学才教授给予了我这个机会，实现了研究生生涯自我价值。本课题的每一项工作都凝聚了导师的心血和汗水，在课题研究遇到了瓶颈时，导师点明了方向攻克了难题。老师的渊博的学问，严谨的治学态度和精诚事业心让我受益匪浅，对我人生今后的道路产生了深远的影响，在平时的科研和学习中，本着互相交流的原则跟老师在某些问题上有过分歧，在此向导师表示深刻的歉意和愧疚。

感谢我的家人及女朋友这么多年来对我的信任，支持和关怀，感谢父母多年养育之恩，在学业最困难的时候你们给予我最大的支持。

感谢教研室所有的师兄师弟师妹，特别是我的室友陈代尧宽容的态度，李泽思严谨的思维，蒋波无私的心灵都深深的打动了我，能与你们共室三年是我的最大的荣幸，在此特别感谢王玉杰师弟对课题的后续所做的工作。

最后感谢贵钢第三轧钢厂唐斌部长，非常感谢在贵钢时对我的照顾和帮助，特别是现场试验时给予我们最大的人力和物力支持。

在此向你们表示深深的谢意。

参考文献

- [1] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000, 56-150
- [2] 唐飞. 机器视觉圆钢坯轮廓与裂纹测量[D]. 成都: 电子科技大学, 2013, 2-16
- [3] J. B. Liao, M. H. Wu. A coordinate measuring machine vision system[J]. Computers in Industry, 1999, (38)10: 239-248
- [4] 王宗义. 线结构光视觉传感器与水下三维探测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005, 30-35
- [5] 王庆阳. 线结构光三维传感中关键技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2006, 32-62
- [6] 苏显渝, 李继陶. 三维面形测量技术的新进展[J]. 物理, 1996, 25(10): 614-620
- [7] TSAI R. Y. A Versatile. Camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using the shelf TV camera and lenses[J]. IEEE Int J Robot Automat, 1987, 3(4): 323-344
- [8] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2000, 22(11): 1330-1334
- [9] 刘奇俊. 圆钢(管坯)在线检测技术的开发与应用[J]. 钢管, 1993, 19(2): 43-44
- [10] 工业和信息化部. 《钢铁工业“十二五”发展规划》[N]. 人民日报, 2011
- [11] 程知松. 双半径椭圆孔型在大圆钢轧制中的构成方法[J]. 轧钢, 2006, 23(1): 61-63
- [12] 习家容. 0Cr16Ni6 六角钢棒拉拔工艺研究[J]. 特钢技术, 2009, 15(61): 39-42
- [13] 温景林. 金属挤压与拉拔工艺学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1996, 151-174
- [14] 杨金日. 光切法视觉测量系统中关键技术研究[实现][D]. 大连: 大连理工大学, 2011, 40-56
- [15] 李武斌, 路长厚, 李君, et al.. 圆钢表面缺陷视觉检测技术研究现状与展望[J]. 无损检测, 2011, 34(5): 54-58
- [16] 鲍凯, 王俊涛, 吴东流. 新兴的无损检测技术-红外热波成像检测[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 393-397
- [17] 桑新柱, 吕乃光. 三维形状测量方法及发展趋势[J]. 北京机械工业学院学报, 2001, 16(2): 32-38
- [18] 苏柯, 余学才, 朱良销, 等. 激光锁定成像获取强背景光下的目标图像[J]. 2010, 40(12): 1293-1297
- [19] 苏柯. 激光锁定成像技术在复杂工业环境检测中的应用[D]. 成都: 电子科技大学. 2011, 20-50
- [20] 吴柯庆. 火车导轨磨耗机器视觉测量系统中的若干问题研究[D]. 成都: 电子科技大学,

2012, 32-60

- [21] 王文革. 基于计算机视觉的大型复杂曲面三维测量关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003, 32-64
- [22] 谭晓波. 摄像机标定及相关技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004, 30-60
- [23] Janne Heikkila, olli Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition San Juan Puerto Rieo, 1997, 1106-1112
- [24] ZHANG Song. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 83-121
- [25] 张加海. 线结构光三维测量系统的建模与标定[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008, 20-60
- [26] 王巍, 魏振忠, 张广军. Tsai 摄像机平面靶标定方法中歧义解的再探讨[J]. 红外与激光工程, 2010, 3(增刊): 1-3
- [27] 徐杰. 机器视觉中摄像机标定 Tsai 两步法的分析与改进[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 45-48
- [28] 赵宣铭. 一种基于 Tsai 法的摄像机改进标定法[J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(4): 560-565
- [29] 万聪灵, 余学才, 蒋波, 李泽思. 线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法[J]. 计量学报, 2014, 35(1): 34-38
- [30] 吴福华, 余学才, 吴柯庆, 等. 自动图像校正原理与方法及在火车导轨图像测量中的应用[J]. 计量学报, 2012, 33(5): 1-4
- [31] 吴福华. 自动图像标定及其在钢轨磨耗测量中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2012, 10-60
- [32] 张维光, 赵宏, 张琦, 周翔. 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 180-188
- [33] 张维光, 赵宏. 线结构光多传感器三维测量系统误差校正方法[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(6): 75-80
- [34] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing Third Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011, 20-500
- [35] Otsu NA. Threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Traps, 1979, SMC(9): 62-66
- [36] 汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维 OTSU 自适应阈值选取算法的快速实现[J]. 自动化学报, 2007, 33(9): 968-970
- [37] 黄志斌. 面向车辆牌照的 L 快速二值比算法[J]. 华侨大学学报, 2002, 23(4): 427-430

- [38] 郑宏, 袁宇正. 基于并行模板的二值地形图串行细化算法[J]. 武测科技, 1995, 1(2): 18-21
- [39] Pavlidis T. Algorithms for Graphics and Image Processing[M]. Rockville Washington D C USA: Computer Science Press, 1982, 30-402
- [40] Chin R T, Wan H K, Stover D L, et al.. A one-pass thinning algorithm and its parallel implementation[J]. Computer Vision Graphics Image Processing, 1987, 40(1): 30-40
- [41] Hall R W. Fast parallel thinning algorithms: parallel speed and connectivity preservation [J]. Communication of ACM, 1989, 32(1): 124-131
- [42] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Comm ACM, 1984, 27(5): 236-239
- [43] 梅园, 孙怀江, 夏德深. 一种基于改进后模板的图像快速细化算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(9): 1306-1311
- [44] GUO Zicheng, Richard W H. Parallel thinning with two-subiteration algorithms[J]. Communications of ACM, 1989, 32(3): 359-373
- [45] 家隆, 郭成安. 一种适于串行机实现的图像并行细化算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(1): 112-117
- [46] LES P, WAYNE T. The NURBS Book[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997, 20-300
- [47] Park H. Error-bounded biarc approximation of plannar curves[J]. Computer Aided Design, 2004, 36(12): 1241-1251
- [48] Piegl L, Tiller W. Data approximation using biarcs[J]. Engineering with Computers, 2002, 18(1): 59-65
- [49] Piegl L, Tiller W. Biarc approximation of NURBS curves[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(11): 807-814
- [50] Yuen H K, Illingworth J, Kittler J. Ellipse Detection using the Hough Transform[C]. Proceedings of the Forth Alvey Vision Conference, 1988, 60-64
- [51] Anderw F. Siegel. Robust regression using repeated medians[J]. Biometrika, 1982, 69(1): 242-244
- [52] Andrew Fitzgibbon, Maurizio Pilu, Robert B. Fisher. Direct least squre fitting of ellipses[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5), 476-480
- [53] Stone R. C. Digital centering algorithms for the sun, moon, and planets[J]. AJ, 1990, 91(1): 424-430
- [54] 晃阳. 基于特征识别的指针式仪表自动识别研究[D]. 济南: 山东大学, 2005, 20-60
- [55] Lei Xu. A new curve detection method: randomized Hough transform[J]. Pattern Recognition Lett, 1990, 11(5): 331-338

- [56] 李武斌, 路长厚, 李君, 张建川. 圆钢表面缺陷视觉检测技术研究现状与展望[J]. 无损检测, 2011, 34(5): 56-57

攻读硕士学位期间取得的成果

- [1] 万聪灵, 余学才, 蒋波, 李泽思. 线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法[J]. 计量学报, 2014, 35(1): 34 - 38
- [2] 蒋波, 余学才, 万聪灵, 李泽思. 基于调制白光照射的锁定成像. 光电工程[J], 2014, 41(1): 83 - 86
- [3] 万聪灵, 余学才, 李泽思, 蒋波. 高温钢坯机器视觉轮廓尺度在线检测软件[P]. 中国, 软件著作权, 2013SR080057, 2013. 8. 2