

电子科技大学
UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

硕士学位论文

MASTER THESIS

(电子科技大学图标)

论文题目 钢坯表面裂纹图像检测

学科专业 光学工程

学号 201221050228

作者姓名 付邦瑞

指导教师 张利勋 副研究员

分类号 _____ 密级 _____

UDC ^{注1} _____

学 位 论 文

钢坯表面裂纹图像检测

(题名和副题名)

付邦瑞

(作者姓名)

指导教师 张利勋 副研究员

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 2015.04 论文答辩日期 2015.05

学位授予单位和日期 电子科技大学 2015年 06月 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。

IMAGE DETECTION ON SURFACE CRACK OF BILLET

A Master Thesis Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China

Major: Optical Engineering
Author: Fu Bangrui
Advisor: Zhang Lixun
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

钢坯生产的过程中出现的各种缺陷不仅影响着钢坯的质量，还给企业带来重大的经济损失，所以钢坯表面裂纹检测技术成为提高钢坯生产率和提高企业竞争力的关键技术之一。传统的钢坯表面缺陷检测方法在高温的生产过程中已不能满足检测要求，因此以机器视觉为基础的表面缺陷检测技术成为今后发展趋势，该技术在海外发展较成熟，检测系统已经应用于钢坯生产线上，但是国内对于此技术的研究还处于起步阶段，这就影响了我国钢铁产品的市场竞争力，因此该技术急需研究。

本文阐述了基于机器视觉的高温钢坯裂纹检测的数字图像处理理论，同时还介绍了检测系统的硬件构架。高温钢坯裂纹检测的具体过程如下：首先利用 CCD 摄像机获取钢坯图像，针对钢坯生产过程中不停跳动，利用锁定区域算法将要处理的钢坯区域锁定出来，然后，根据钢坯表面在高温情况下所具有的光谱特征，对钢坯区域进行灰度直方图统计，利用灰度统计特征进行图像分割，接着对铁屑层的铁屑进行膨胀处理，最后是缺陷判决，对于铁屑层，利用 Hough 直线检测判断是否有划痕，对于灰度层，利用 Sobel 边缘检测，根据 Sobel 算子判断是否有裂纹。硬件部分有检测系统的框架结构，系统水冷，隔尘罩和 CCD 像机的固定支架。

该检测方法简单、稳定、准确，在首钢贵阳特殊钢有限公司的钢坯生产线上已经得以验证，且满足其要求，有较高的应用价值。然而，目前获取到的钢坯表面缺陷种类有限，所以下一步要对各种缺陷的识别与分类进行研究，以保证钢坯表面缺陷的准确检测。

关键词：高温钢坯，机器视觉，表面缺陷检测，图像处理

ABSTRACT

In the process of the billet production, various defects affect the quality of the billet and bring great economic losses, so the billet surface crack detection technology becomes one of the keys to improve the productivity of steel and enterprise competitiveness. Traditional detection methods are not applied to the high temperature, so the detection technology based on machine vision is the development trend in the future. Machine vision detection technology is relatively mature in foreign countries, and the detection system has been used in the production line of billet, but domestic research in this is still in infancy, as result, the market competitiveness of China's iron and steel products has been affected, so the technology is in urgent need of research.

The theory of digital image processing on hot billet crack detection based on machine vision is expounded and the hardware structure of detection system is introduced in the thesis. The specific steps of crack detection on hot billet are as follows: first, images of billet are obtained by CCD camera, as the billet keeps beating during production, the locking region method is used to find interested place; then according to the spectral characteristics of the hot billet, threshold segmentation are made based on histogram of interested region and iron filings are inflated; the last step is defection, Hough line detection is used to judge whether there are wounds and Sobel edge detection is used to judge whether there are cracks. Hardware includes the frame structure of the detection system, water cooling of system, separated dust cover, CCD camera and its fixed bracket.

The detection method is simple, stable and accurate, it has been verified in the billet production line of Guiyang, as result, the method meets the requirement and has higher application value. But at present, the species of billet surface defects are limited, in order to ensure accuracy of detection, we will be focused on various kinds of defects recognition and classification in the next step.

Keywords: Hot billet, machine vision, surface defect detection, image processing

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 钢坯缺陷检测方法的概述	2
1.2.1 人工检测方法	2
1.2.2 自动无损检测方法	2
1.2.3 机器视觉检测方法	4
1.3 国内外发展现状	5
1.4 研究意义及论文结构安排	7
1.4.1 研究内容及难点	7
1.4.2 论文结构安排	7
第二章 钢坯裂纹检测系统研究	9
2.1 检测系统	9
2.1.1 检测系统的性能要求	9
2.1.2 检测系统结构设计	10
2.2 钢坯缺陷检测设计	12
2.2.1 钢坯裂纹检测内容	13
2.2.2 钢坯裂纹检测流程图	13
2.3 本章小结	15
第三章 钢坯表面缺陷预处理	16
3.1 钢坯图像滤波去噪	16
3.1.1 邻域平均法	17
3.1.2 中值滤波	18
3.1.3 高斯滤波	18
3.1.4 维纳滤波	19
3.1.5 实验结果与分析	20
3.2 钢坯图像提取	22
3.2.1 图像旋转	22
3.2.2 锁定图像区域	23
3.2.3 实验结果及分析	24
3.3 钢坯区域分割	25

3.3.1 直方图谷底分割	25
3.3.2 迭代阈值分割	26
3.3.3 OTSU (大津法)	27
3.3.4 峰值阈值分割	28
3.3.5 实验结果及分析	29
3.4 图像膨胀	30
3.5 本章小结	32
第四章 钢坯表面缺陷决策判断	33
4.1 钢坯缺陷常见种类	33
4.2 裂纹提取	36
4.2.1 边缘检测	36
4.2.2 裂纹参数计算	41
4.3 划伤提取	43
4.4 钢坯表面缺陷判断	44
4.5 本章小结	45
第五章 裂纹检测系统的软件设计	46
5.1 软件系统	46
5.1.1 软件需求分析	46
5.1.2 软件框架设计	47
5.1.3 软件流程图设计	48
5.1.4 软件方案介绍	49
5.2 本章小结	52
第六章 裂纹检测试验结果	53
6.1 实验检测结果	53
6.2 现场检测结果	54
6.3 本章小结	57
第七章 全文总结与展望	58
7.1 全文总结	58
7.2 展望	58
致 谢	60
参考文献	61
攻读硕士学位期间取得的成果	65

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

钢铁在工业制造中被广泛应用，其使用已涉及汽车行业、航天领域、机械加工、船舶制造等^[1]。经济的快速发展促进了钢铁需求不断加大，钢铁的质量成为人们的首要关注问题。原材料、生产环境、生产工艺等方面容易造成钢坯生产过程中出现裂纹、划痕、氧化皮和孔洞等多种缺陷，如果在生产过程中不能及时检测出来加以停止，会导致带有缺陷的产品批量生产，最终浪费了材质。此外，带有缺陷的钢坯在耐磨、抗腐蚀等性能上有不同程度上有所降低^[2]，这就直接严重影响最终产品的性能。我国是生产钢铁的大国，但是与发达国家相比，我国的钢铁生产在成品率和合格率却有着很大的差距，因此，在钢坯生产过程中，及时把缺陷检测出来成为钢铁企业提高钢坯质量的关键。

我国部分钢铁企业仍采用传统检测法^[3-5]，如人工目视、闪频光检测、涡流检测法、红外检测法和漏磁检测法等。生产线速度的加快、人工检测的不规范性及工人眼睛容易疲劳造成漏检和误检，使得人工检测已不再适用。涡流检测速度快，可以在线检测，但是难以检测与涡流方向平行的细小缺陷，所以只能检测出形状简单的缺陷^[6]；红外检测对环境的要求较高，且检测的缺陷种类有限；漏磁检测装置构架复杂，不好维护，并且容易因为钢坯的振动而受干扰，不能适应高速的生产条件，难以完成钢坯的高速在线检测。所以，急需一种新的检测方法来改进上述方法，进而提高钢坯缺陷检测的效率和准确性。基于机器视觉的检测技术正好弥补以上不足，该技术结合了机器视觉和数字图像处理技术，在高温、高速生产条件下能够将钢坯缺陷实时准确地检测出来。

目前，全球各国的大多数钢铁企业都在寻求高效的钢坯表面缺陷检测的方法和途径，所以这方面的技术研究对钢铁生产十分重要。基于机器视觉检测钢坯表面缺陷的关键技术都由某些发达国家掌握着，并且有了可以投入生产线使用的成熟的产品；然而，在国内有关于钢坯表面缺陷检测的研究较少，大多数是进行理论研究和仿真试验。因此，国内钢铁企业想提高钢成品率和合格率，钢坯表面缺陷检测就成为关键因素。

算法设计是利用机器视觉检测钢坯表面缺陷的关键，算法的设计简单与否是判断检测系统性能好坏的主要根据，本课题依据数字图像处理技术，对检测系统中 CCD 像机采集到的图像进行算法研究，旨在提高钢坯表面缺陷检测的准确性、增强算法的稳定性和快速性，确保能够完成高温钢坯表面缺陷的实时准确检测。

1.2 钢坯缺陷检测方法的概述

钢坯表面缺陷检测在钢坯生产线上有巨大的应用价值，其大体经历了三个阶段：人工检测、自动无损检测和基于机器视觉检测。随着人们对钢铁质量的更高要求，检测系统更趋向于智能、准确、简单和稳定。

1.2.1 人工检测方法

非自动化的人工检测，主要有以下两种：

(1) 人工目测检测就是检测人员用肉眼来观察缺陷，主要应用于五六十年代，由于生产线上钢坯的速度太快，人眼捕获不到准确的缺陷信息，所以易造成很多误检及漏检。另外，钢坯生产现场处于高温、噪音大、粉尘多的环境，不利于检测人员的身心健康。因此，人工目视检测法已经不再适用于高温、高速的钢坯生产线。

(2) 频闪光检测^[7]应用于七十年代，该方法利用 $10-30\mu s$ 的脉冲闪光使人的视网膜产生静止反应，在脉冲闪光的时间内，物体以 $10m/s$ 的速度移动的实际只移动了 $0.1mm$ ，相对人眼可看作静止，清楚的图像便留于人眼。对缺陷特征熟悉且接受过培训的检查者，能将速度为 $200m/min$ 的钢坯上存在的缺陷检测出来。然而其主观因素较高、可信度低且不自动化，难以保证钢坯的质量。

1.2.2 自动无损检测方法

目前国际上应用于钢坯生产中的自动无损检测方法能检测钢坯表面的缺陷，部分还可以检测出钢坯内部的缺陷，但是，可检测的缺陷种类较少，不能将钢坯缺陷完全检测出来。有关无损检测法的概述如下：

(1) 涡流检测法

涡流检测法^[8]检测钢坯缺陷的依据是电磁感应原理。靠近金属的线圈通上交变电流后，金属产生感应电流，该电流产生磁场，从而使线圈的阻抗发生变化。如果线圈的阻抗变化，待测物就会影响磁场，从而检测出缺陷。1989年，法国的洛林连轧公司福斯厂^[9]成功研发出涡流探测设备 EDISIOL，该设备在火焰切割设备的前端，能够在线检测热钢坯表面的缺陷。EDISIOL 设备将涡流探测器安装在钢板上下表面时，通过横向往复移动来检测纵向裂纹，将涡流探测器安装在板坯窄面和棱边周围时检测横裂及角裂，因为板坯宽面的温度高于居里点，窄面和棱边周围的温度却低于居里点，所以用了不同的差动式涡流探测器，检测原理如图 1-1 所示。涡流检测法只能把钢板表面或者表皮下层的阻流缺陷检测出来，且必须接入大励磁电流，浪费很大能源，要加热保证待测钢板的均匀温度，这样生产的速

度就会受到限制，所以涡流检测法不适用于高速钢坯生产线。

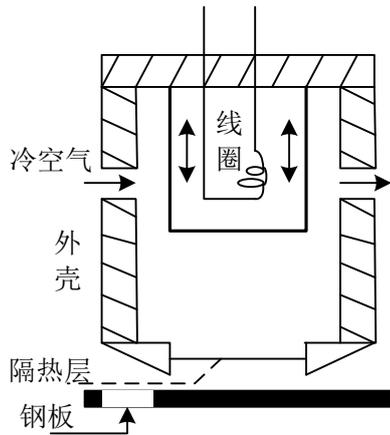


图 1-1 涡流检测原理图

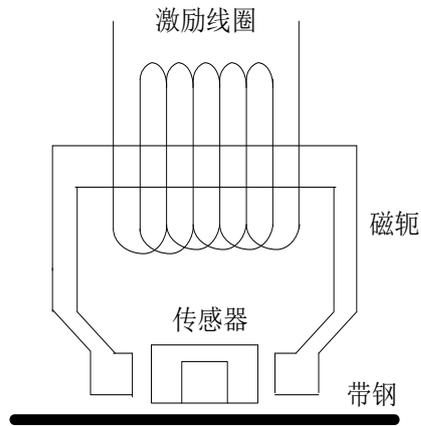


图 1-3 漏磁检测原理图

(2) 红外检测法

红外检测法的检测原理是利用钢坯缺陷处有电流流过时产热而生成红外线，将红外辐射能变成电信号，将被检测钢坯的温度场以图像形式显示，温度场是否均匀决定被检钢坯是否有缺陷。1990年，挪威的Elkem根据该原理研制发出钢坯自动监测系统^[10-11]，检测如图1-2所示。该方法检测精确、效率高，能进行较大面积的检测和快速扫描，应用于比绝对温度高的物体，操作安全，但费用高，实际应用中不适用横向缺陷的检测，检测的种类较少。

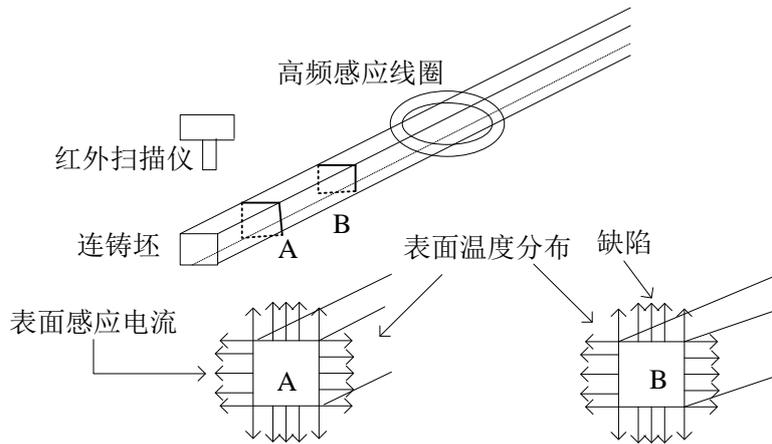


图 1-2 红外检测原理

(3) 漏磁检测法

漏磁检测法^[12]依据漏磁通密度正比于缺陷体积，可以由漏磁通的密度判断缺陷大小和简单种类。在直流磁场中，钢坯被磁化且生成轴向饱和磁场。若钢坯有缺陷，磁通道的改变引起漏磁场的扩散，传感器能把泄露的磁力线检测出来，从

而检测出钢坯缺陷的大小。1993年，日本川崎一制铁所利用该原理研制了非金属夹杂物的在线检测设备^[13]，该设备的检测原理如图1-3。该装置除了能检测钢坯表面的缺陷，还可检测出钢坯内部微小的缺陷，其对于温度要求不高，检测精度高，廉价，但是其不适用于钢坯表面粗糙度的检测，也不能对大量的表面缺陷检测及分类。

1.2.3 机器视觉检测方法

随着激光技术、CCD技术的相继问世，计算机技术与数字图像处理的相结合，机器视觉得以快速发展，成为钢坯缺陷检测的热点术应运而生并迅速发展起来。机器视觉检测方法主要有激光扫描检测和CCD检测法。

(1) 激光扫描检测法

激光扫描检测^[14]法的光源选用激光束，激光束照射在扫描镜上后，被检测物体被反复穿过，反射回来的激光信号被光电倍增管系统收集，最终经过软件处理判断出缺陷的尺寸和定位。70年代，日本川崎公司研发出镀锌在线检测系统^[15]，该装置分别利用斜交和平行激光扫描系统检测钢坯表面缺陷。1971年，伦敦SIPA工学院、CITY大学联合英国钢铁公司，研发出扫描光源采用激光器的检测系统^[16]。1988年，德国SICK公司也研发出利用平行激光进行扫描的检测装置，检测原理如图1-4所示。具体过程是：由低功率激光器发出的激光，首先通过反射镜，被投射到旋转的多面体棱镜，然后棱镜对钢板运动的垂直方向进行横向扫描，经过棱镜反射的光被投射到钢板的表面，经过光电倍增器，接收装置将反射光及散射光进行光电转换，最后将电信号传到上位机，完成处理和识别。

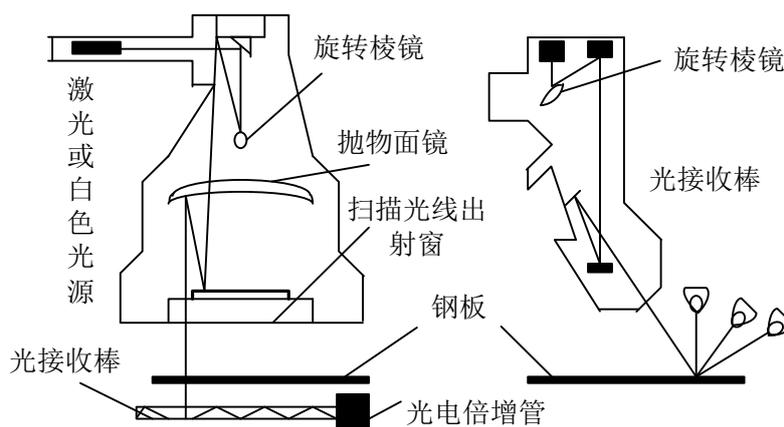


图 1-4 激光扫描检测原理

(2) CCD 检测法

CCD检测法利用某种特殊光源，例如红外线、激光、荧光管等，以一定的方

向夹角照射钢板的表面，然后用 CCD 像机扫描钢坯生成图像，最后将图像保存在计算机内，通过数字图像处理技术提取出有关缺陷的相关参数，再对图像进行缺陷的识别，进而检测出缺陷的种类。相对于其他的检测方法，该方法精确度高、更灵活，属于真正的非接触的无损检测。微处理器的高速、图像传感器的快速发展使得 CCD 检测法成为主流。生产过程中钢坯温度高达 $750^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，CCD 检测法是非接触式，受影响小，且具有抗干扰的特点，所以 CCD 检测法能够达到很好的检测效果。

1.3 国内外发展现状

美国 Teledyne 公司根据红外热成像技术，研发出钢材实时检测系统^[17]。该系统有三大模块：实时处理、红外像机及系统处理。利用红外像机对沿纵向运动的钢坯进行横向扫描，实时处理器对形成的图像进行处理判断有无缺陷，最后系统处理器决定缺陷种类和深度。

2004 年，美国 Hongbin 等人开发了一套针对圆钢表面缺陷的检测系统，该系统利用支持向量机^[18] (SVM)，先根据水平方向算子大致检测裂纹缺陷，然后用区域生长法获得缺陷区域，最后依据 SVM 决定圆钢表面是否存在裂纹。该系统对于细长的裂纹检出率几乎达到 100%，正确率 90% 以上，实时性好，但是难以对除了细长纵向裂纹以外的缺陷进行检测。

2010 年，韩国在 2006 年研发对线材型钢进行缺陷检测的基础上，改用圆形平面光源，设计出一项对圆钢表面缺陷进行检测的系统^[19]，该系统包括两部分：检测装备及软件检测。检测装备有传感器、光源系统以及信号处理等，软件模块就是在线检测缺陷的算法。该系统适用于速度低于 18 m/s 的、圆钢直径不低于 14 mm 的生产线，且实时性很好，应用比较广，使用圆形平面光源加强了系统的稳定性，使得光源及传感器减少震动引起的影响。

美国佑捷科技 (OG Technologies, Inc) 对于影像式线棒材表面的在线检测技术领先于其他国家^[20]。其系统精确度高，可以将 0.025 mm 的裂纹检测出来，可适用在高于 100 m/s 的速度和温度高达 1650°C 的生产条件，且能适应直径为 $5\text{-}250\text{ mm}$ 的圆钢。2006 年，研发出的 HotEye^[21] 检测系统第一次投入商业使用，随着被广泛应用，获得了大量数据和各类棒材表面特征图。图 1-5 所示 HotEye 的摄像器材配置图，采用 4 个摄像头，提高了分辨率，视角对钢坯全方位覆盖，对钢坯图像进行无盲区获取。图 1-6 所示 HotEye 检测原理图。该系统采用主动光视觉检测，由于可见光自身特点，对钢坯表面进行强光投射后，缺陷处的光强变化较明显，就会引起图像明暗度的变化，最后利用图像处理技术完成钢坯缺陷的检测。

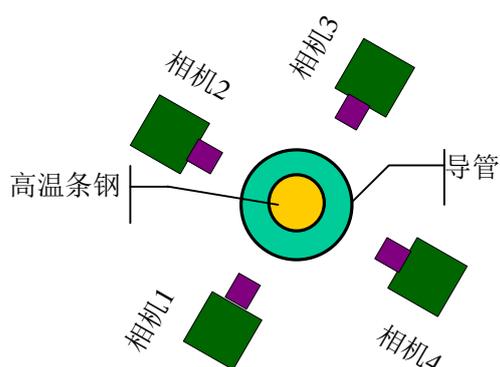


图 1-5 HotEye 摄像器件配置图

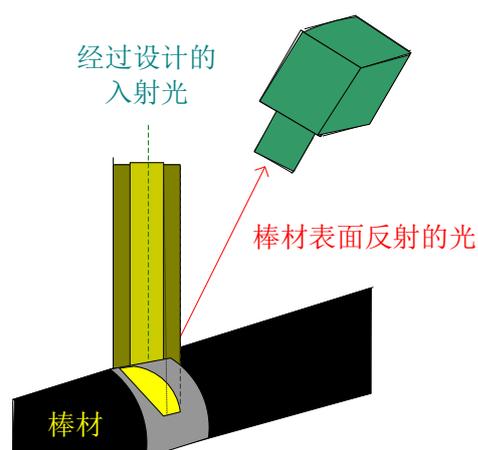


图 1-6 HotEye 检测原理图

相对于发达国家，我国对于机器视觉检测热钢坯起步较晚，技术也不成熟。近年来，国内高校联合部分钢铁企业对于这方面的技术进行了研究。

在上世纪 90 年代，罗志勇教授首次根据激光扫描原理，完成冷轧钢板宽度的测量及孔洞缺陷的检测。1995 年又研制出了检测冷轧带钢缺陷和测量最小带宽的实验系统^[22-23]。同年，哈尔滨工业大学利用神经网络分类器，开始对静态的缺陷检测研究^[24-25]。2002 年，北京科技大学研发出针对冷轧钢坯表面缺陷的检测系统，利用面阵像机进行图像同步采集，分析过程用多个计算机并行处理，该系统可以检测常见的几种缺陷及分类^[26-30]，特征选择方面采用了熵理论，通过 BP 神经网络构建出缺陷识别分类器。2003 年，天津大学展开了基于机器视觉的在线检测研究，该检测和识别系统利用结合了 DSP 和 FPGA 技术^[31-32]。2006 年，上海宝钢研究院研发出高速冷轧检测系统^[33]，能够检测出边裂、孔洞等缺陷。

2010 年香港大学的关于圆钢表面缺陷检测系统专利，该系统的算法首先对获取到的圆钢图像进行高斯滤波，然后根据二阶微分算子进行异常度计算，若图像的行间或列间的微分算子大于阈值，则判定该圆钢表面有缺陷判。虽然该方法简单快速，但是不适用于噪声较多的图像，此外，该算法中在处理过程中存在着模板的设定问题。

2010 年，台湾国立成功大学 Liu Yung-Chun 等人提出了机器视觉系统来检测圆钢表面缺陷^[34]，该系统结合了两种分类器：神经网络分类器（BPN）和相关向量机（RVM），能够有效检测裂纹、刮伤、疤痕和压痕四种缺陷，检测一幅像素为 2048×512 的图像耗时 0.2839s，正确率接近 85%。该算法预处理阶段进行了高斯滤波和脉冲增强滤波，为了改善圆钢跳动引起的图像扭曲，对图像进行了拉直处理，然后对垂直方向进行 Sobel 变换，把图像与设计好的进行模板卷积、二值化和

区域生长运算，最后利用分类器识别表面缺陷。虽然可以识别 12 种缺陷的灰度特征，但是检测系统准确率不高。

1.4 研究意义及论文结构安排

有关高温钢坯在线检测的系统，国内目前还没有研制出比较完善的产品，导致国内钢铁行业在国际上没有竞争力。国内的部分钢铁企业选择购买国外设备，比如宝钢。但是，国外引进的检测设备价格比较昂贵，大都在百万以上，例如美国的 HotEye 检测设备。近年来，我国要加大对钢铁行业的投入，若一味的引进国外技术，国内的钢铁行业发展就无法得到快速发展。这就促成该校联合贵钢，研发了高温钢坯检测系统，该系统能够将贵钢在线生产过程中的缺陷钢坯检测出来。

1.4.1 研究内容及难点

本课题的主要研究内容是：运用数字图像处理技术，进行高温在线钢坯表面裂纹检测的算法研究，通过现场测试，研究钢坯裂纹检测的最佳处理方法，保证算法的实时性和稳定性。在算法设计中以下两个方面成为难点：

(1) 钢坯裂纹检测的准确性

钢坯高温在线生产过程中，钢坯的抖动，使图像的区域而不确定，如果之锁定要处理的区域就容易造成误判，影响检测的准确性。为解决上述问题，本文在进行特征提取前进行区域锁定运算，保证误判问题。

(2) 钢坯裂纹检测的实时性

由于钢坯生产速度接近 10 m/s ，速度很快，此外，为了能获取同一时刻钢坯的全方位图像，用一个 CCD 像机无法满足要求，本系统采用了 3 个 CCD 像机分别获取左、右、上方向的图片。为了保证检测的实时性，本文采用多线程技术以及线程同步。

1.4.2 论文结构安排

本文旨在研究在线高温钢坯表面的裂纹检测，保证钢坯产品的质量。论文的结构安排如下：

第一章：绪论。首先简单介绍了钢坯表面缺陷检测的研究背景，然后对钢坯缺陷检测方法进行了概述，包括传统的方法和现在主流的基于机器视觉的检测，分析了多种检测方法的优缺点，并对国内外的的发展状况作了总结。最后本文在设计过程中的难点，对本文主要研究的内容作了总结。

第二章：钢坯裂纹检测系统研究。介绍了钢坯裂纹检测的性能要求及硬件组

成，简述了系统所需要检测的内容，且根据钢坯缺陷各自所具有的特征，对检测算法进行了分析，设计了算法的流程图，对每一步作了详细地分析。

第三章：钢坯表面图像预处理。针对获取的钢坯原图像带有噪声，提出了图像滤波去噪的多种方法，并进行了实验结果对比，选择了合适的滤波方法，由于钢坯在上图像与左右图像的位置关系，为了后面算法的方便，对上图像进行了旋转处理，为了避免误判，进行了钢坯区域的锁定，对于钢坯图像的分割，提出多种分割方法，对各种方法的实验结果进行了对比与分析，最后为了避免漏判，对钢坯图像上的铁屑进行了膨胀处理。

第四章：钢坯表面缺陷决策判断。首先介绍了钢坯缺陷的常见种类，然后针对钢坯裂纹的提取方法进行了实验结果比较，选用基于 Sobel 边缘检测法对裂纹进行了识别，根据划伤直线分布特点，采用 Hough 直线检测方法将划伤识别出来。最后根据进行缺陷决策判断。

第五章：裂纹检测系统的软件设计。根据实际使用情况对软件的需求进行了分析，介绍了软件的框架设计以及软件设计流程图，并对检测系统的软件方案进行了详细的描述。

第六章：裂纹检测试验结果。对钢坯检测系统分别进行了实验和钢坯生产现场的测试，且对钢坯缺陷检测系统的准确率进行了评估，证明了该系统的准确性和稳定性。

第七章：全文总结与展望。对本论文所做的工作进行总结，且对下一步的工作进行展望。

第二章 钢坯裂纹检测系统研究

在生产过程中的钢坯，由于制作工艺和材质等因素，可能会出现钢坯表面有氧化皮、裂纹、划伤等缺陷。本系统采用基于 VC++ 数字图像处理的非接触式技术来检测钢坯表面的缺陷，以保证及时将钢坯生产线上不合格的产品剔除，从而提高钢铁产品的质量。

2.1 检测系统

钢坯裂纹检测系统主要包括硬件设计以及软件设计，根据实际应用情况，对系统的性能进行分析决定检测算法的复杂程度，考虑到钢坯生产环境进行硬件上的改进，保证获取到高质量的图像及检测系统的实用性。钢坯裂纹检测系统在现场的运行情况如图 2-1 所示。



图 2-1 钢坯检测系统现场运行图

2.1.1 检测系统的性能要求

考虑到钢坯高速、高温的生产环境，一个合格的钢坯在线检测系统应该满足以下性能要求：

(1) 实时性：钢坯生产线的速度在 $10m/s$ ，系统应实时提供钢坯缺陷的状况和信息，以便在缺陷出现时预警，让生产线上的工作人员及时发现问题，马上对带有缺陷的钢坯进行处理，避免不合格钢坯的批量生产。与线下检测系统相比，在线检测系统对实时性的要求会更高。因此，在对系统进行设计时，除了保证硬

件上 CCD 像机对图像采集的高速与高分辨率之外，在软件算法上，要确保算法的简单，快速。保证系统的实时性是实现检测系统具有在线实用价值的基础。

(2) 准确性：在保证缺陷检测系统的基础上，对钢坯表面不同类型的缺陷，要根据缺陷本身的特征将其准确地检测出来。如果在检测过程中产生误判，就会造成钢坯生产过程的频繁警报，影响产品的正常生产；若没有将生产线上带有缺陷的钢坯检测出来就会影响钢坯的质量，因此，钢坯缺陷检测系统的准确性起着重要的作用。虽然，在钢坯缺陷的检测系统中，检测的实时性与准确性是相互制约的，想要提高监测系统的准确率，需要考虑的因素就会很多，进而就加大了算法的复杂程度，降低了系统的实时性，即使钢铁企业在追求钢坯产品的高质量，也必须要保证检测系统不能影响到钢坯生产的正常运行。鉴于此情况，应该在保证检测系统实时性的条件下，利用优化算法来提高钢坯缺陷系统的准确性，从而提高钢坯的生产质量。

(3) 稳定性：钢坯缺陷检测系统的稳定性体现在硬件装置的稳定以及软件性能的鲁棒性。由于钢坯的生产处于高温的环境中，在硬件上首先保证用于图像采集的 CCD 像机、检测系统的安装构架和图像向 PC 机的传输线等能够长时间正常运行，不出现影响钢坯生产的较大故障。在软件设计方面，要保证程序的正常运行，算法有较好的鲁棒性，能够保存检测的数据以便以后查看，且有易于工作人员操作的界面。

钢坯缺陷的在线检测系统，只有在性能上提高以上三个方面，才能够保证缺陷的及时剔除和钢坯产品的正常生产，才具有在线检测的真正使用价值。

2.1.2 检测系统结构设计

图像的采集。对于钢坯表面缺陷的在线检测，不同的检测环境会导致检测系统装置上的不同，例如像机、光源、处理机等方面的选取。由于前期获取到的图像，对于后期基于数字图像处理的钢坯表面检测的算法有着直接的影响，高质量的图像能够使钢坯表面缺陷的检测以及识别更加准确。

图像传感器有 CMOS 和 CCD 两种，相同分辨率的情况下，CMOS 价格要比 CCD 低，耗电量要比 CCD 低，但是，其噪声较大，对光源的依赖性比较强，且产生的图像质量比 CCD 低。CCD 传感器^[35-36]制造工艺复杂，成本较高，噪声小。虽然其可以提供优异的影响品质，但随之付出的代价就是耗电高。

根据两种图像传感器的特点，鉴于钢坯表面检测对图像高质量，高分辨率的需求，本系统选用韩国 Vieworks 厂家 VH 系列的 VH-310G2-M264A0 工业像机，该像机最高帧频是 264fps，分辨率为 640×480。使用该像机可直接用千兆以太网

网线连接到计算机上，把该像机获取的图像高速传输到计算机，进行钢坯图像的处理，而不需要额外图像采集设备，该像机的工作电压在 3.3-24V 之间，电流 10mA。

触发方式有外部触发和内部触发两种，因为本系统采用 3 台 CCD 像机在同一垂直平面以 120 度夹角同时对钢坯进行图像拍摄，所以为了保证同步性，此处采用外部触发。CCD 像机的装置如图 2-2 所示：

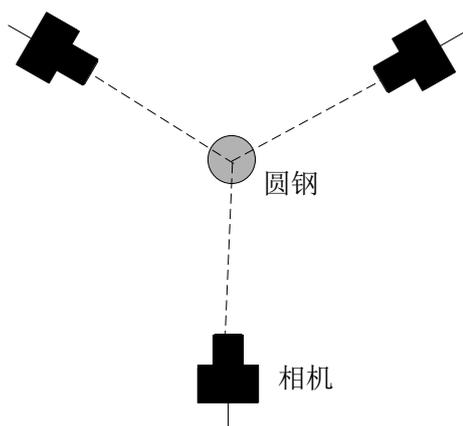


图 2-2 CCD 像机装置图

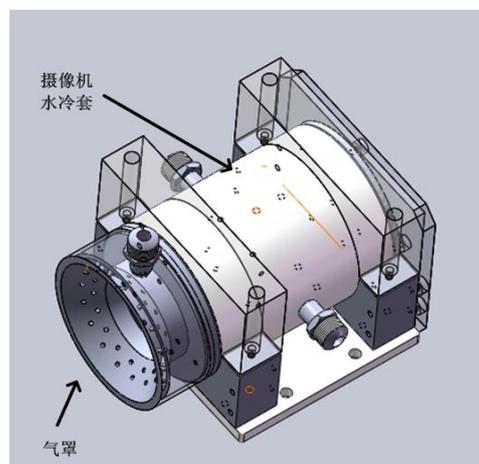


图 2-4 CCD 像机制冷及隔尘装置示意图

像机的触发方式如图 2-3 所示，采用上升沿触发，即外部信号由最低电平上升到最高电平的瞬间像机开启。

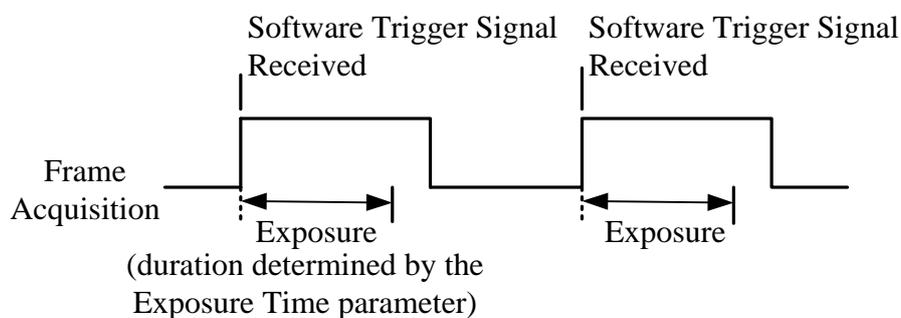


图 2-3 像机外部触发

制冷与防尘部分。钢坯的轧制过程中，钢坯的运行速度很快，使得铁屑从钢坯表面脱落，造成系统处于高粉尘环境中，且钢坯表面一直处于 600~800℃ 的高温状态。若 CCD 像机长期工作在这样的环境下，肯定导致系统无法正常工作。所以，对 CCD 像机进行降温以及防尘保护，保护装置如图 2-4 所示。其工作原理是：冷水套与水管接连起来，通过冷水套的水流动进行降温；通过把气管连接到气罩，向气管内压缩空气，从而起到防尘的作用。

计算机系统。钢坯的在线生产过程中，钢坯的速度高达 $10m/s$ ，本系统利用 3 个 CCD 像机获取图像，涉及到多线程技术。所以在选择计算机的处理速度要求很高，另外系统用于人们监视现场钢坯状态的显示器刷新率和分辨率要高，否则可能有拖尾，且会影响对细小缺陷的观察。此外，生产过程中获取的每一幅原图像及处理过的带有缺陷的图像都会保存在计算机的硬盘上，虽然本系统在存钢坯图像的时候，每月定期对图像进行自动清理，但是一个月內钢坯的生产量很大，即使图像是 8Bit 的灰度图，图像存储量也是巨大的。根据实际需求，计算机在处理速度和存储上的要求很高，本系统采用了联想 T4900V intel i7 商用台式机，四核八线程，1TB 硬存容量。

钢坯检测系统的设计方案如图 2-5 所示。

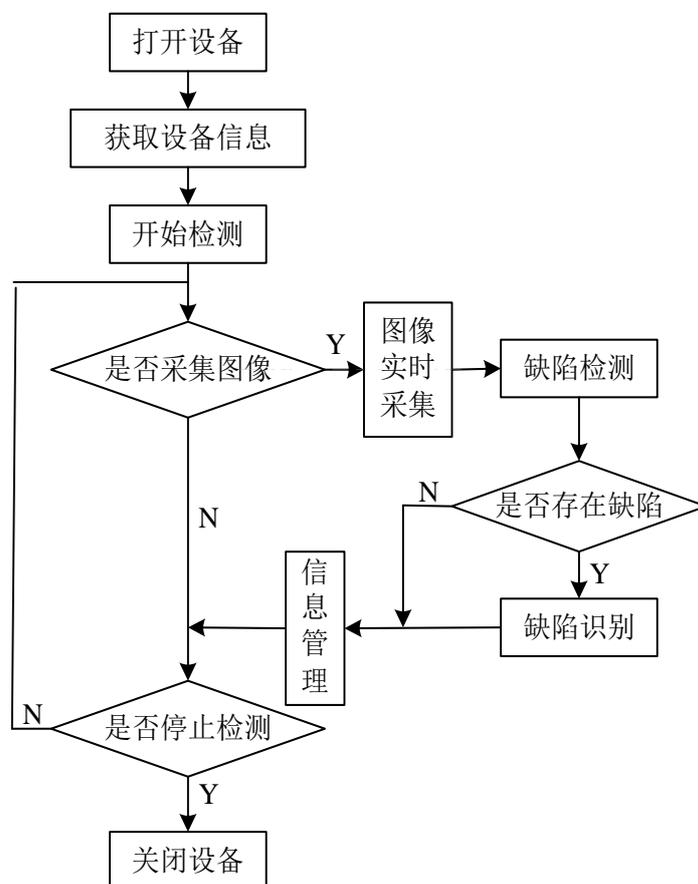


图 2-5 钢坯检测系统设计方案图

2.2 钢坯缺陷检测设计

针对钢坯铸造过程中出现的缺陷特点，本小节将对裂纹检测内容进行简单的概述，且对检测算法设计思路进行分析。

2.2.1 钢坯裂纹检测内容

钢坯的生产过程中，缺陷和铁屑的体积相对钢坯本身小得多，所以钢坯本身的温度最高，铁屑是附着钢坯的表面，温度会较低。由于缺陷是在钢坯的内部，所以，在三者在辐射的红外光的强度上会有所差距。通过像机把三者红外光的差别体现在现场获取的图像上，红外光强度的差别会导致图像在灰度上的不同，然后根据图像上缺陷的灰度特点及形状特征，结合钢坯表面的灰度特点，最终将缺陷检测和识别出来。

贵钢生产的钢坯表面缺陷有氧化铁皮、裂纹、划伤和伪缺陷四种，整个算法为在线检测。在钢坯的缺陷检测过程中，除了将钢坯表面的缺陷检测出来，还要对缺陷的特征信息进行统计，例如裂纹的宽度、长度和面积，划伤的周长等。钢坯缺陷的这些特征信息能够反映出其大小，如果钢坯缺陷的大小在允许的范围内，该钢坯就可以看作合格产品，如果缺陷的大小超出了检测标准，该钢坯应被视为不合格产品，应重新铸造。

2.2.2 钢坯裂纹检测流程图

将 CCD 像机获取到的图像经过网线传送到计算机，然后进行检测的算法处理。采用不同的算法，会产生不同的处理效果，本算法的依据是不同缺陷在图像上所体现出来的灰度等级不同，下面介绍四种缺陷的灰度分布特点、形态特征和算法的思想。

划伤的灰度较氧化铁皮相对偏高，形状呈长直线状，且平行于铸造方向；裂纹在图像中的灰度最高，比较亮；伪缺陷有两种：氧化铁皮及刻字，氧化铁皮部分在整幅图片中偏暗，且面积较图像较小，形状连续呈鳞状分布；刻字位于钢坯的边缘部位。根据上述四种缺陷的特征，本文在判断前两种缺陷之前，会先排除伪缺陷的影响。根据各种缺陷的灰度统计直方图，不难发现氧化皮和划痕的灰度分布均小于灰度统计图峰值，然而裂纹的灰度则相反，分布接近于峰值的或者大于峰值的范围内，因此可以将氧化铁皮和划痕划分为同一灰度层，裂纹单独在一灰度层。最后，将同一灰度层的氧化铁皮和划伤运用边缘检测方法进行检测以及识别。下面将介绍该算法的大致过程，检测的流程图如图 2-6。

(1) 对采集到的图像进行滤波处理。由于 CCD 像机所处的环境影响，获取到的图像一般都会有噪声的存在，且部分噪声不能用肉眼辨别出来，若没有去噪这一过程，后面的图像处理将会受到很大的影响。因此，首先滤除原始图像上的噪声。

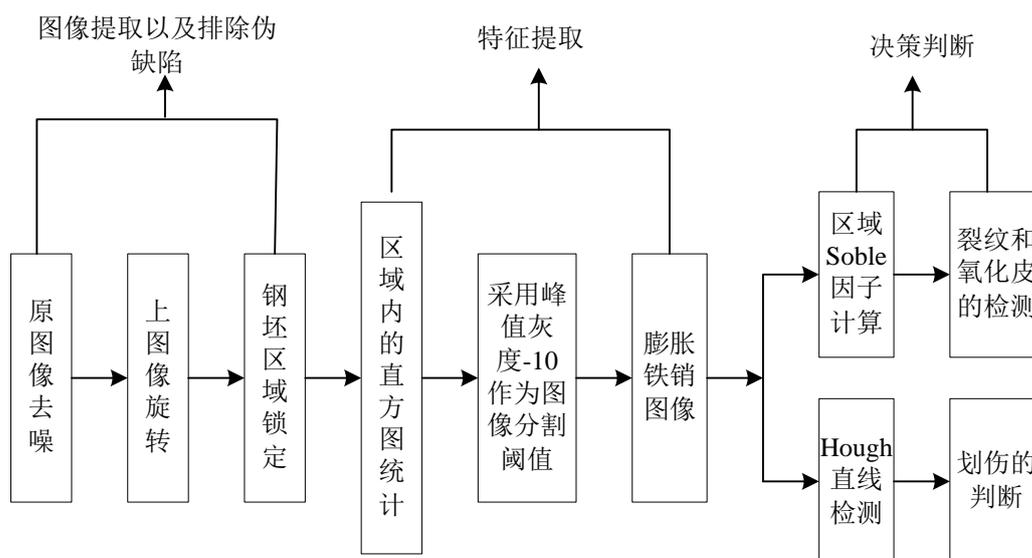


图 2-6 钢坯表面裂纹检测算法流程图

(2) 对上图像进行旋转处理。由于在检测系统中用了 3 个 CCD 像机，且每两个像机之间的夹角是 120 度，所以上像机获取的图像（以后简称为“上图像”）中的钢坯方向与左、右像机获取的图像（后面分别简称“左图像”，“右图像”）中的钢坯方向垂直，由于后面的处理方法需要两者方向一致，所以应把上图像进行旋转处理，以便于后面的图像处理。

(3) 对钢坯所在区域进行锁定。将目标区域锁定出来，一方面可以减少数据量的运算，加快实时处理的速度，另一方面还可以避免将刻字和钢坯边缘误判成裂纹。该过程是整个算法的关键。

(4) 对步骤 (3) 中锁定的区域进行灰度统计直方图。根据各种缺陷的灰度分布图，可以看出各自的灰度分布等级，所以为了区分开氧化皮层和裂纹层，要求其灰度的峰值。求灰度的峰值可以用灰度统计直方图或者最小二乘法，但是前者更直接，更简单，所以选择利用灰度直方图求灰度峰值。

(5) 利用灰度峰值减 10 作为阈值进行图像的分割。该过程的阈值选取非常重要，选值太大，造成误检，选值偏小，造成漏检。通过分割后，氧化铁皮层和裂纹层被分开，便于下面的缺陷识别。

(6) 对氧化铁层的铁屑进行膨胀。经过上面的分割后，铁屑被分到氧化铁皮层，但是铁屑会散发光强，使得氧化铁皮层并没有将铁屑的边缘涵盖进去，所以应对铁屑进行膨胀，确保把铁屑的全部都被包含到氧化铁层，避免对缺陷的误判，保证算法的准确性。

(7) 对钢坯表面的缺陷进行识别和分类。对于裂纹的检测，采用边缘检测方法将其从图像中分割出来，边缘检测的方法很多，且有着各自的特点以及适用场

合。本算法对图像用多种边缘检测方法进行了处理，经过对比，最后采用了 Sobel 边缘检测。将 Sobel 边缘检测算子作为裂纹的长度，如果统计的裂纹长度超过了一定阈值，就判定为裂纹。对于氧化铁皮层，利用 Hough 直线检测法，将划伤检测出来。

2.3 本章小结

本章主要讲述了高温钢坯在线检测系统的性能要求，并根据实际需求，对系统的结构及硬件作了分析及选择，提出了系统设计流程图，最后介绍了钢坯裂纹检测系统需要检测的内容，对钢坯缺陷进行了特征分析，简述了该系统中检测算法的设计思路，设计出对钢坯表面进行裂纹检测的具体流程，且对流程的每一步作了详细的分析。

第三章 钢坯表面缺陷预处理

钢坯表面缺陷决策判断之前，首先要利用数字图像处理技术把缺陷特征提取出来，然后再根据缺陷的特点对缺陷进行识别与分类。图像预处理主要包括图像区域提取以及钢坯缺陷特征的提取。本章将对图像预处理过程作详细的分析，为之后的缺陷决策判断做准备。

3.1 钢坯图像滤波去噪

虽然整个钢坯测量系统被封闭起来，避免了外面环境对图像的质量产生影响，确保 CCD 像机可以获取到的图像没有背景光的干扰，但是用于图像采集的器件自身的影响，造成获取到的钢坯图像出现噪声等。所以，要选用合适的滤波算法对图像上的噪声进行平滑处理，提高图像的质量，以利于图像的后期处理。图像的噪声有很多种，常见的种类有随机噪声、椒盐噪声以及高斯噪声^[37-38]等。

(1) 乘性噪声。乘性噪声与图像信号有关，假设图像函数为 $f(x, y)$ ， $n(x, y)$ 是噪声函数，则满足：

$$f(x, y) = f(x, y)[1 + n(x, y)] = f(x, y) + f(x, y)n(x, y) \quad (3-1)$$

(2) 椒盐噪声。在图像中呈现黑白杂点，如果图像中的最大灰度值是 255，噪声强度的大小是 d ，则满足：

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) < d/2 \\ 255, & d/2 \leq f(x, y) \leq d \\ f(x, y), & other \end{cases} \quad (3-2)$$

(3) 高斯噪声。是 n 维分布都服从高斯分布的噪声，即概率密度函数服从期望为 μ ，方差为 σ^2 的正态分布。如果有一幅图像函数为 $f(x, y)$ ，该图像被污染，噪声函数为 $g(x, y)$ ，则满足：

$$f(x, y) = f(x, y) + g(x, y) = f(x, y) + \mu + \sigma X \quad X \sim N(0, 1) \quad (3-3)$$

噪声不仅降低了图像的质量，还使图像变模糊，将图像原有的部分特征被噪声替代，增加图像分析的难度。针对噪声问题，可以利用图像滤波去除部分噪声。在空间域方法中，在图像滤波过程中，经常被采用的去噪方法除了均值滤波还有中值滤波。

为了说明钢坯表面图像的噪声类型，通过无任何缺陷的钢坯图像的灰度直方

图进行数据分析，图 3-1 是钢坯图像，图 3-2 是钢坯图像直方图。

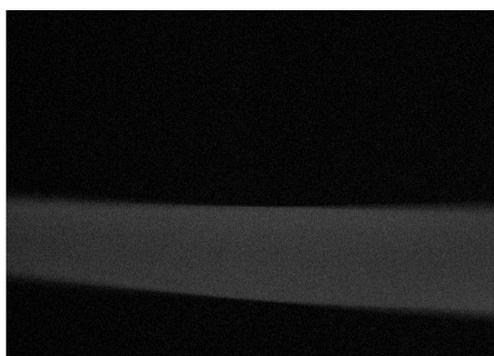


图 3-1 无缺陷钢坯表面图像

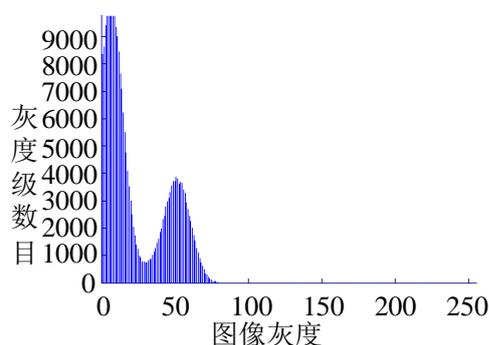


图 3-2 无缺陷钢坯图像直方图

从图 3-2 钢坯图像的灰度直方图分布特点，可以初步得知获取到的钢坯图像中的噪声为高斯噪声。

3.1.1 邻域平均法

邻域平均滤波法是空间滤波的一种，属于线性滤波，是均值滤波中主要被采用的方法。该滤波的基本工作原理为：用均值来代替原图像中除了边缘的各个像素。基于邻域的平滑方法主要有： 3×3 均值滤波，超限邻域平均法和选择式掩模平滑^[39]。

(1) 3×3 均值滤波。该滤波方法的原理如下： $f(x, y)$ 是给定的原图像，该图像是带有噪声的，假如另 $g(x, y)$ 是加有噪声的图像经过简单的均值滤波之后的图像，那么原图像与处理之后的图像之间的关系可以表示为：

$$g(x, y) = \sum_{(x, y) \in T} f(x, y) / M \quad (3-4)$$

上式中 M 表示在所选取的邻域中总共包含像素的个数， T 为所包含的像素坐标。对于邻域 A 的选择有不同的选取方式，如下所示：

$$A = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

为了保持图像被平滑处理之后的平均值不改变，让模板里各个元素的和为 1。通过对在接近模板中心的元素赋予比较大的加权值，来避免滤波后图像的模糊程度，突出像素点本身。

(2) 超限邻域平均法。该滤波方法的原理是：选取一个灰度值作为阈值，用图像中的某个像素的灰度值与该像素点邻近的像素平均值之差与该阈值进行比

较，当差值大于阈值时，用平均值替换该像素点的灰度值，否则，该点的灰度值保持不变。数学表达式如下：

$$g(x, y) = \begin{cases} \bar{f}(x, y), & (f(x, y) - \bar{f}(x, y)) > T \\ f(x, y), & \text{other} \end{cases} \quad (3-6)$$

虽然 3×3 均值滤波简单，但是该方法会造成边缘模糊效应。对于图像中本来不是噪声的像素点，应该保留其原来的边缘灰度值，但是通过均值滤波后，其边缘处的灰度变得很均匀，就导致边缘模糊。对于图像中的微小灰度差，超限邻域平均法能够较好地保护，减少边缘的模糊现象，同时这种算法对于图像中的椒盐噪声滤除比较有效。

3.1.2 中值滤波

中值滤波同均值滤波一样，也属于空间滤波的一种，不同的是中值滤波属于非线性处理^[40-41]。中值滤波的基本原理是：将数字图像或者数字序列中的某一点灰度值用这点的一个邻域中各点（个数是奇数）灰度值的中间值代替，以确保周围点的灰度值接近实际值，达到消除孤立噪声的目的。例如邻域内有五个点，灰度分别是 102, 85, 48, 92, 150，则利用中值滤波后，会取第三个数值 92 作为该点的灰度值。该方法不仅可用于处理一维的信号，对于二维信号，该方法也同样适用。

假设有一维数字信号的序列 $X_i (-\infty < i < +\infty)$ ，进行中值滤波处理时，首先要选取一个长为 L 的序列， L 必须为一奇数，即 $L = 2N + 1$ ， N 为正整数。假如在某一时刻窗口的信号为 $X_{i-v}, \dots, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, \dots, X_{i+v}$ ， $v = (L-1)/2$ ，然后将该长度为 L 的信号序列进行升序（或者降序）排列，在排列好的序列中将中间值，即 X_i 定义为中值滤波的输出值，可以表示为：

$$y_i = \text{med} \{X_{i-v}, \dots, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, \dots, X_{i+v}\} \quad (3-7)$$

对图像进行的中值滤波时，设数字图像的像素点的灰度值为 $f(x, y)$ ，则将滤波的窗口为 A 的中值滤波器表示为：

$$G(x, y) = \text{med} \{G(x, y)\}, \quad (x, y) \in A \quad (3-8)$$

3.1.3 高斯滤波

高斯滤波属于线性滤波^[42]，对于邻域内像素的灰度进行取值时，为了能够降低滤波处理所带来的模糊效应，得到更好的滤波效果，与均值滤波不同，高斯滤

波在模板的选择时，模板不同的位置赋予不同的权值。

将连续的二维高斯函数进行离散化就得到高斯模板，所以要想建立高斯模板，只需建立 $(2k+1) \times (2k+1)$ 的矩阵 M 得到，高斯模板的大小由矩阵中的 K 决定，像素点 (i, j) 的值可通过公式 3-9 确定：

$$M(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i-k-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-9)$$

离中心点的距离越远，权重会越小，离中心最近的权重最高，目的是在图像进行滤波时，能够保证图像整体的灰度分布特征更好地保持。 3×3 邻域的高斯模板 B 如下所示：

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

3.1.4 维纳滤波

维纳滤波^[43]是基于最小均方误差准则，对平稳过程的最优估计器，该方法的输出与期望输出之间的均方误差最小，被看作一种最佳滤波方法。该方法的基本原理如下：

设白噪声为 $w(t)$ ，期望信号为 $x(t)$ ，冲击响应为 $h(t)$ ，则输入信号 $y(t)$ 满足关系式 3-11，输出信号为 $\hat{x}(t)$ 满足关系式 3-12。

$$y(t) = x(t) + w(t) \quad (3-11)$$

$$\hat{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)y(t-\tau)d\tau \quad (3-12)$$

输出 $\hat{x}(t)$ 对 $x(t)$ 期望信号的均方误差表达式如下：

$$\overline{\varepsilon^2(t)} = E\left(\hat{x}(t) - x(t)\right) \quad (3-13)$$

最小均方误差时的冲击响应 $h_{opt}(t)$ 满足下列关系式如下：

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau - \sigma)h_{opt}(\sigma)d\sigma = 0, \tau \geq 0 \quad (3-14)$$

上式中 $R_{yx}(t)$ 是 $y(t)$ 与 $x(t)$ 的互相关函数， $R_{yy}(t)$ 表示 $y(t)$ 的自相关函数，由公式 3-14 求解出 $h_{opt}(t)$ 。

3.1.5 实验结果与分析

带有裂纹的钢坯的噪声图像及该图像的灰度直方图如图 3-3 所示：

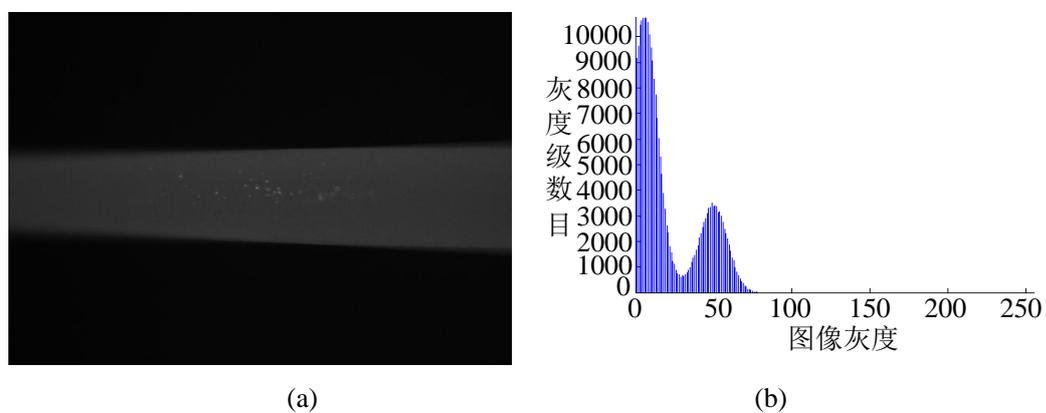


图 3-3 裂纹图像及直方图

(a) 裂纹噪声图；(b) 裂纹噪声直方图

经过对上述滤波方法的介绍，图 3-4 是对图 3-3 中的钢坯噪声图进行各种滤波后的效果图。

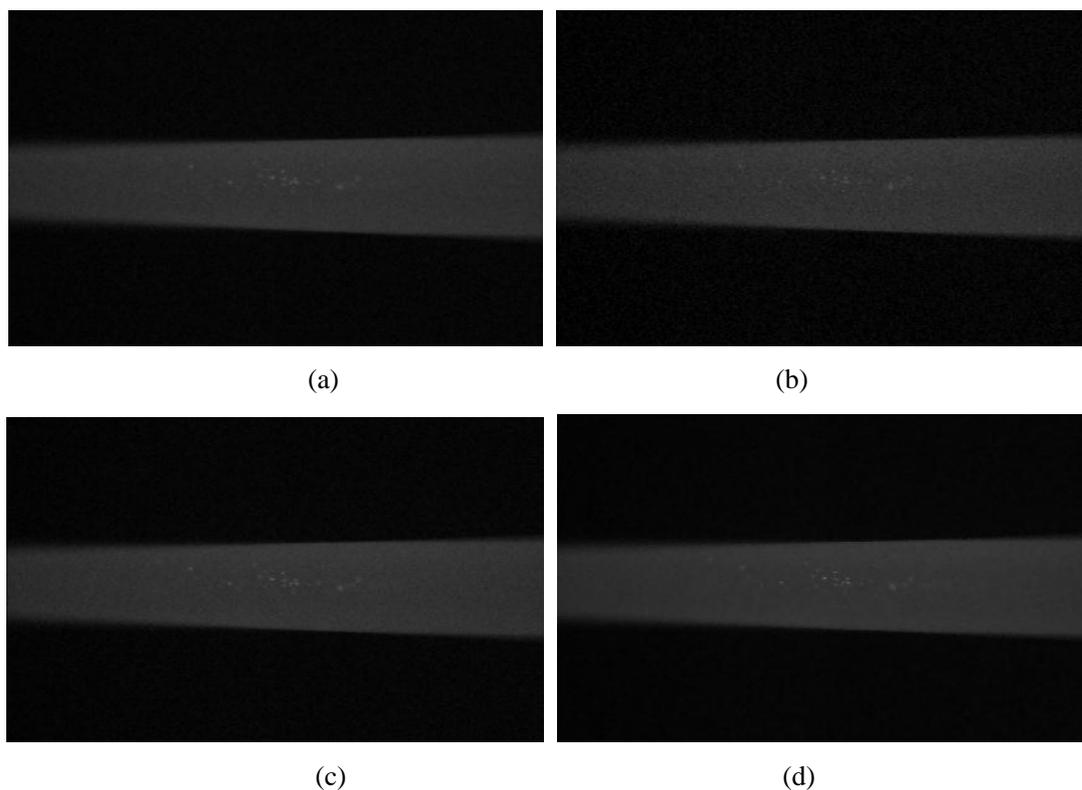


图 3-4 钢坯裂纹图像滤波效果图

(a) 均值滤波效果图；(b) 中值滤波效果图；(c) 高斯滤波效果图；(d) 维纳滤波效果图

通过图 3-4 可以看出，对于钢坯裂纹噪声图像的滤波，中值滤波效果最差，部分细节当成了噪声，所以对点、线及顶点较多的噪声不宜采用中值滤波，其去除椒盐噪声效果较好，对于高斯噪声不适用；根据目测，均值滤波与高斯滤波的效果差不多，但高斯去噪比均值去噪的边缘模糊度较低，更好地保留了有用的信息；维纳滤波效果最好。

图 3-4 只能通过目测进行判断各种滤波法的效果，会存在一定的主观因素，造成结果的不准确性，图 3-5 对各个滤波后的图像进行了灰度直方图统计，对结果进一步说明。

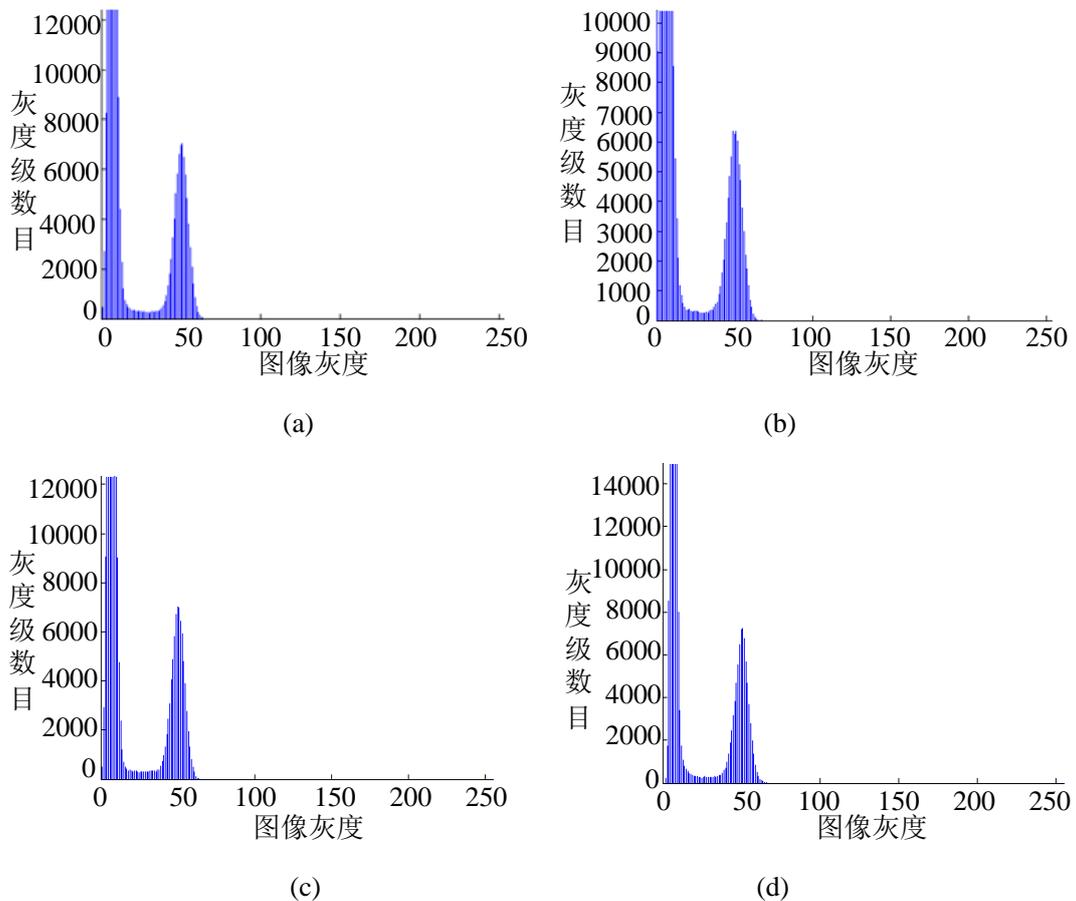


图 3-5 钢坯裂纹图像滤波后灰度直方图

(a) 均值滤波后直方图；(b) 中值滤波后直方图；(c) 高斯滤波后直方图；(d) 维纳滤波后直方图

通过图 3-5 与图 3-3 中的灰度直方图比较，可以看出这 4 种滤波方法对高斯噪声都起到了一定的抑制作用。均值滤波的很多背景和钢坯区域噪声都没有滤除，高斯滤波较均值滤波稍好，维纳滤波效果最好，背景部分的噪声去除效果最好，钢坯区域的细节保存最好，这样能够保证后期对钢坯区域锁定的准确性。

3.2 钢坯图像提取

钢坯图像的提取主要包括两个方面：对上像机获取的图像（简称“上图像”）进行旋转以及对钢坯所在区域进行锁定。上图像上的钢坯方向沿上下方向，左右像机获取的图像上的钢坯的方向沿水平方向，为了后面钢坯锁定处理的一致性，首先对上图像进行旋转处理。

像机获取到的钢坯的图像分为钢坯部分和背景部分，背景部分在整幅图像中几乎占据了一半以上的空间，在图像检测处理的过程中会占用很多时间，对于以高达 $10m/s$ 的速度生产的钢坯进行缺陷检测，若不去除对背景部分的图像处理，很难确保该系统对在线钢坯的实时检测。此外，钢坯的边界与背景交接的边缘处的灰度差很大，这就对缺陷的检测带来干扰，若不去除边缘部分，就会导致钢坯缺陷的误判。另外，贵钢在钢坯的某边缘会刻上该公司生产等字，在获取到的部分上图像的左边缘会以细长条状，灰度较高的形式体现出来，若不去除边缘部分，容易将这些字误判成裂纹。

3.2.1 图像旋转

图像旋转都是图像中的某一点作为原点，对图像中的每一像素点都进行一定角度的旋转，旋转原点一般会选图像的中心。经过旋转后，图像的长度与宽度都会发生改变。图像的旋转示意图如图 3-6 所示：

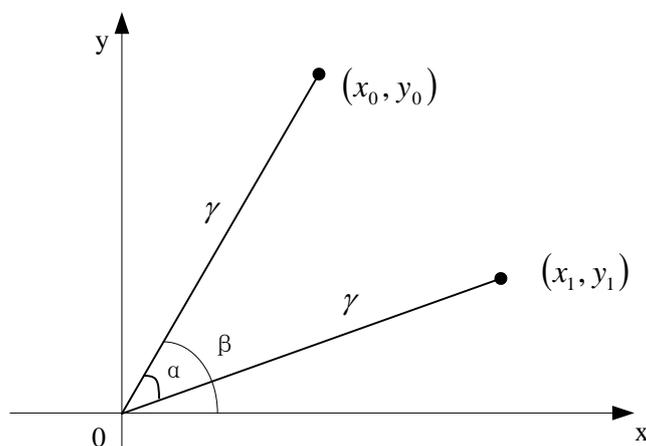


图 3-6 图像的旋转示意图

点 (x_0, y_0) 的坐标旋转 α 度后变成 (x_1, y_1) ，旋转之前关系式如下：

$$\begin{cases} x_0 = \gamma \cos \beta \\ y_0 = \gamma \sin \beta \end{cases} \quad (3-15)$$

旋转之后关系式为：

$$\begin{cases} x1 = \gamma \cos(\beta - \alpha) = \gamma \cos \beta \cos \alpha + \gamma \sin \beta \sin \alpha = x0 \cos \alpha + y0 \sin \alpha \\ y1 = \gamma \sin(\beta - \alpha) = \gamma \sin \beta \cos \alpha - \gamma \cos \beta \sin \alpha = -x0 \sin \alpha + y0 \cos \alpha \end{cases} \quad (3-16)$$

上述旋转原点进行，向右为 X 轴正向，向上为 Y 轴正向，其为坐标系 II，若令在图像中，经常选左上角为原点，向右为 X 方向，向下为 Y 轴的正方向，则坐标系变为 I。本算法中的旋转角度选为 90 度，原图像的长度变成后来图像的宽度，原图像的宽度成为后来图像的高度。如图 3-7 所示：

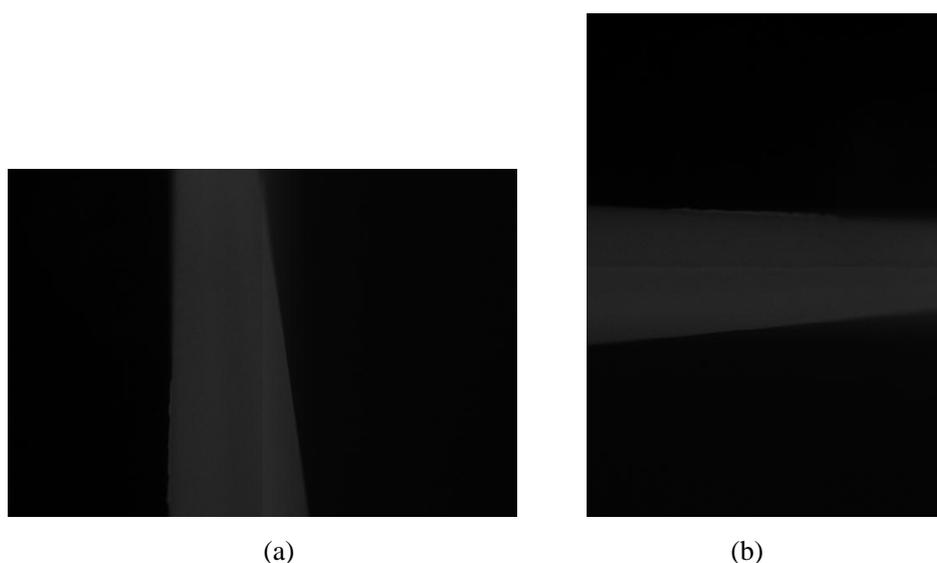


图 3-7 上图像刻字图

(a) 钢坯上图像；(b) 钢坯上图像顺时针旋转 90 度

3.2.2 锁定图像区域

对于钢坯区域的锁定，必须先分析图像中的钢坯和背景之间的灰度关系。以右像机获取的原图像为例，图 3-4 是经过滤波之后的右图像。

从图中不难发现，有两条上下斜线，该斜线分别是钢坯与图像背景的边界线，可以看作是钢坯的上下侧边缘，且边界两侧的灰度差值很大。所以可以选用边缘两侧单像素梯度差值法来确定钢坯的四个顶点坐标，从而将钢坯从整幅图像中锁定出来。该锁定方法速度快，能满足实时性的要求，但是，该方法对于钢坯图像的边缘处有噪声这种情况不适用，会导致区域的锁定不准确，所以该方法的鲁棒性有待提高，以确保算法的准确性。

在本算法中分为两步：锁定钢坯所在区域的四个顶点坐标，利用四个顶点坐标对钢坯位置进行锁定。四个顶点的确定是在局部边界搜索法^[44-45]第一步的基础上进行的改进，第二步利用数学点确定直线这一定理。因为利用边缘上下两侧的

单像素点灰度值进行相减，通过该差值进行判断，会导致边缘的误判。所以，在本方法中对钢坯边缘像素点上、下两侧分别选取两个像素点分别求均值，将两个均值进行作差，然后将该差值与某一阈值进行比较。如果被检测点上下两均值的差值大于该阈值，则被判定为边缘点，否则对下一点继续检测。对于钢坯左上角点，应该从图像的第三行开始向图像的下方进行检测，同理求得左下角、右上角以及右下角的坐标确定。这样能避免钢坯与背景边界处的噪声干扰。另外，对于阈值选取很关键，根据图像每列灰度分布图以及实验经验，本算法选取阈值为 10。虽然该阈值是固定的，不是通过自适应选取的，但是该方法使得算法的速度加快，能够满足目前采集环境下的图像。第一步确定钢坯四个顶点之后，利用数学上两点确定一条直线，将钢坯所在的区域进行涵盖。为了观察的方便，此处将钢坯所在区域的灰度值设置为 255。

3.2.3 实验结果及分析

3.2 节主要讲了上图像经过旋转以及锁定钢坯区域处理过程，钢坯各种缺陷经过处理后的结果如图 3-8 所示。

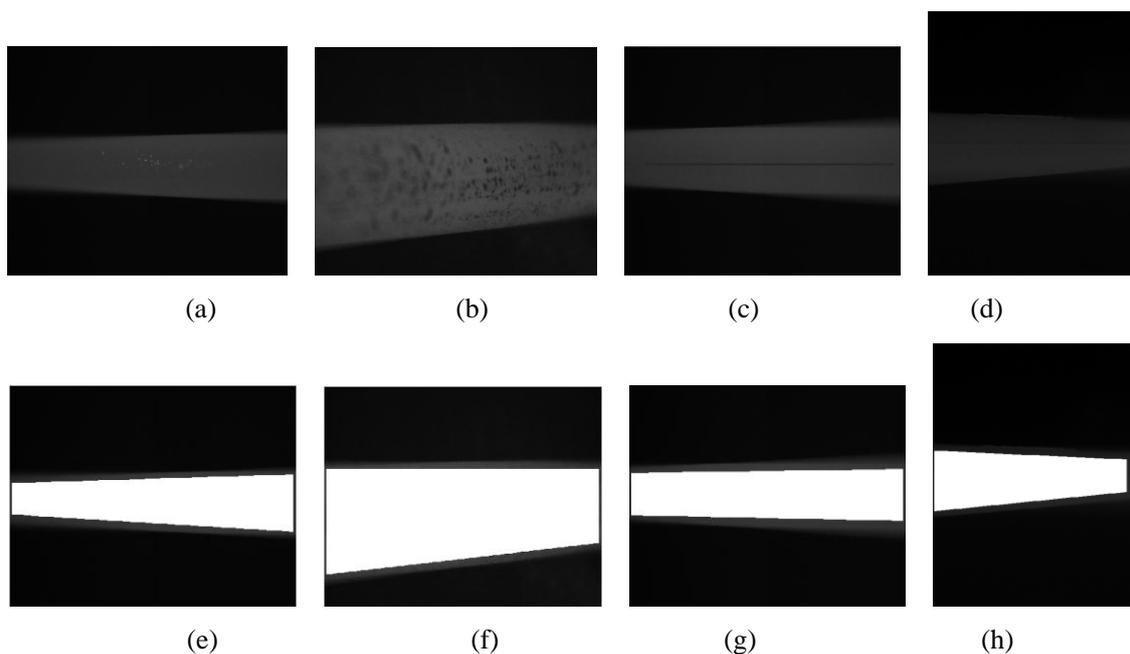


图 3-8 钢坯图及钢坯锁定区域

(a) 钢坯裂纹图像；(b) 钢坯氧化皮图像；(c) 钢坯划伤图像；(d) 刻字上图像；(e) 带裂纹钢坯区域；(f) 带氧化皮钢坯区域；(g) 带划伤钢坯区域；(h) 带刻字钢坯区域

图 3-8 中的图 (a)、(b)、(c) 分别表示裂纹、氧化铁皮及划伤, 图 (d) 表示带有刻字的上图像经过顺时针旋转 90 度之后的图像, 经图 (a) 和 (d) 图对比可以发现, 经过旋转前后, 图像长度和宽度相反, 并且上图像经过 90 度旋转后, 上图像的钢坯边缘的方向由垂直方向变成水平方向, 与左右图像的钢坯边缘方向一致。图 (e)、(f)、(g)、(h) 中白色区域是对钢坯图像进行锁定区域处理后的效果, 白色区域是后面要进行图像处理的范围。经过锁定区域处理后, 钢坯的两个上下边缘已不在后面的处理范围内, 避免了将钢坯边缘误判成裂纹的情况, 另外上图像上面的刻字在进行取出边缘的同时, 也被排除在后面的图像处理之外, 避免将刻字误判成裂纹的可能。为后面的处理提供了有效的区域, 也大大减少了处理图像面积, 使算法的处理速度加快。

3.3 钢坯区域分割

对于本算的设计思想在第二章钢坯裂纹检测的设计思路中已经提到, 由于氧化铁皮, 裂纹以及划伤处像素的灰度值有很大的差别, 氧化铁皮灰度分布较低, 划伤的灰度分布介于氧化铁皮与裂纹之间, 裂纹处的灰度分布较高。所以在缺陷识别之前, 必须用图像分割方法将三者分开。图像的分割^[46-47]方法有阈值分割, 区域分割以及边缘分割。对于区域分割, 区域生长法虽然算法简单, 但是目标较大的时候, 分割的速度较慢, 无法满足钢坯在线监测的实时性, 另外, 该方法的种子必须认为来确定, 应用于钢坯 10m/s 的生产线不太合适。区域分裂合并法, 在进行图像分裂的时候, 区域的边缘有可能被遭到破坏, 导致有效信息丢失, 且该方法计算复杂, 所以在此处也不适用。对于边缘分割, 如果在缺陷全部都在同一灰度层上时应用, 虽然能将缺陷检测出来, 但是表面经常带有铁屑的型钢也会被判断成不合格产品, 会造成误判。所以本算法中采用阈值分割法对图像进行图像灰度层的分割, 得到裂纹所在的灰度层图像和铁屑与划伤所在的铁屑层图像。

3.3.1 直方图谷底分割

如果一幅图像只包含物体和背景两部分, 且物体和背景的灰度值都分布较均匀, 那么该图像的灰度直方图上会有两个峰值, 如图 3-9 所示。当图像满足以上情况时, 将两个峰值之间的谷底值作为阈值, 可以把物体从图像的背景中很好的分割出来。令原图像是 $f(x, y)$, 经过阈值分割后的图像为 $g(x, y)$, 阈值 T 为谷底值则满足以下表达式:

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

这种方法适用于以上比较理想的情况下，虽然简单，但是该方法不适用于两个峰值相差较远的情况，受噪声影响较大。在实际处理的图像中，一般会出现多个物体，此时会有多个峰值，就会用多个阈值进行图像分割。如图 3-10 所示。

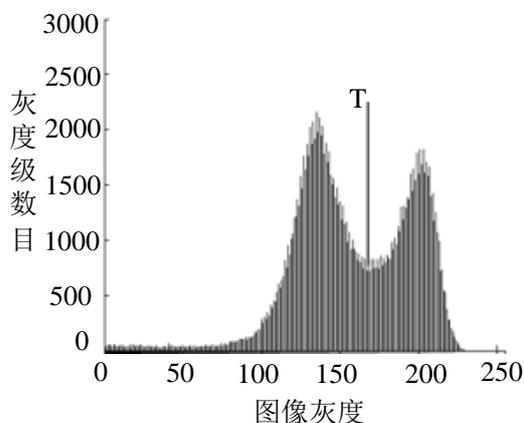


图 3-9 双峰灰度直方图

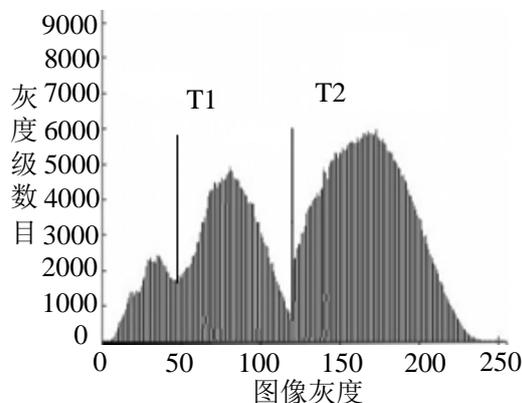


图 3-10 多峰值灰度直方图

由于钢坯图像在进行分割之前，背景已经去除，另外经过对钢坯区域进行直方图统计时，发现其灰度直方图只有单峰值，所以该方法不适用于钢坯锁定区域的缺陷的分割。

3.3.2 迭代阈值分割

在迭代阈值分割中，使用迭代的方法计算出比较合适的阈值。对于阈值的计算原理是：设定一个阈值的估计初始值，然后依照某一规则不断改变初始值，当该值满足已定的条件时，阈值确定。在阈值的选取过程中，迭代规则是关键。迭代选择分割阈值的算法如下：

- (1) 设定初始阈值 T ，一般让 T 等于图像的灰度平均值；
- (2) 利用阈值 T ，把图像的平均灰度划分为 H_1 和 H_2 两部分；
- (3) 分别对 H_1 和 H_2 的灰度求取平均灰度 μ_1 和 μ_2 ；
- (4) 对阈值进行重新选择：

$$T = (\mu_1 + \mu_2) / 2 \quad (3-18)$$

(5) 对步骤二到步骤四进行循环，一直到两组的灰度平均值 μ_1 和 μ_2 不再变化，此时对应的 T 即为进行图像分割的阈值。

如果图像的直方图中出现谷底，迭代阈值分割法能够将目标从图像中很好的分割出来，但是不适用于目标以及背景的灰度值都发生剧烈变化的图像。

3.3.3 OTSU (大津法)

大津法^[48-51]又被称为最大类间方差法,是由日本学者大津提出,属于自适应阈值分割法。利用图像的灰度特性,该方法把图像划分为目标和背景这两个部分。这两部分的类间方差越大意味着两者之间的差别就越大,无论将背景错分为目标,还是将目标部分错划分为背景,都会引起两者的差距减小,所以类方差最大时对应的阈值最合适。

假设图像中的像素点的总个数为 N ,灰度为 i 的像素点的个数为 n_i ,总的灰度级是 K ,则满足以下关系式:

$$N = \sum_{i=0}^{K-1} n_i \quad (3-19)$$

灰度值为 i 的像素存在的概率是:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3-20)$$

对于 K 个灰度级的所有像素概率满足:

$$\sum_{i=0}^{K-1} p_i = 1 \quad (3-21)$$

假设阈值 T 把图像分成 A 和 B 两部分, A 区域像素点的灰度在 $[0, T-1]$ 的范围内, B 区域像素点的灰度在 $[T, K-1]$ 的范围内,那么 A 区域和 B 区域的概率分别表示为:

$$P_A = \sum_{i=0}^{T-1} p_i \quad (3-22)$$

$$P_B = \sum_{i=T}^{K-1} p_i = 1 - P_A \quad (3-23)$$

A 区域与 B 区域的平均灰度分别是:

$$\mu_A = \frac{1}{P_A} \sum_{i=0}^{T-1} ip_i = \frac{\mu(T)}{P_A} \quad (3-24)$$

$$\mu_B = \frac{1}{P_B} \sum_{i=T}^{K-1} ip_i = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - P_B} \quad (3-25)$$

若图像的平均灰度为 μ ,则可表示为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{K-1} ip_i = \sum_{i=0}^{T-1} ip_i + \sum_{i=T}^{K-1} ip_i = P_A \mu_A + P_B \mu_B \quad (3-26)$$

A 区域和 B 区域的总方差是：

$$\sigma^2 = P_A(\mu_A - \mu)^2 + P_B(\mu_B - \mu)^2 = P_A P_B (\mu_A - \mu_B)^2 \quad (3-27)$$

阈值 T 在灰度级 $[0, K-1]$ 范围内进行遍历，当 σ^2 的值最大时，所对应的 T 值就是所求得图像分割阈值。

3.3.4 峰值阈值分割

峰值阈值分割分为如下包括两个过程：求取钢坯区域的灰度峰值以及根据峰值对图像进行二值化。通过锁定区域的灰度直方图统计来计算最大灰度值，然后利用峰值减 10 作为图像分割的阈值。

1、钢坯区域灰度直方图

利用钢坯的区域的灰度直方图统计，根据钢坯区域的灰度分布特征，将钢坯所在的灰度层以及氧化铁皮和划伤所在的灰度层分开。即使具体像素点的灰度在灰度直方图上表现出来，但是通过灰度直方图可以了解对各个灰度级的统计情况，以便为后面阈值的选取做准备。

图像的灰度直方图为一个离散的函数，表示了图像中的各个灰度级及该灰度级出现的频率。假设一幅图像中的长度为 M ，宽度为 N ，则图像的总像素点个数是 $M \times N$ ，灰度级为 i 的像素个数为 $N(r_i)$ ，则图像中各个灰度级的概率 $P(r_i)$ 可以表示为：

$$P(r_i) = \frac{N(r_i)}{M \times N} \quad (3-28)$$

对于 $P(r_i)$ ，满足以下条件：

$$\sum_{i=0}^{255} P(r_i) = 1 \quad (3-29)$$

图 3-11 是对图 3-4 中 (d)、(e)、(f)、(i) 中的白色区域进行的灰度直方图统计，可以发现四个直方图中都只有一个峰值。

2、锁定区域分割阈值的选取

由于本算法是根据对缺陷的灰度分层进行图像特征的提取，所以对于阈值的选取尤其重要。若阈值偏大，就有可能将裂纹划分到氧化皮层，造成裂纹的漏判；若阈值偏小，就有可能将铁屑划分到钢坯的灰度层，从而导致铁屑被误判成裂纹。

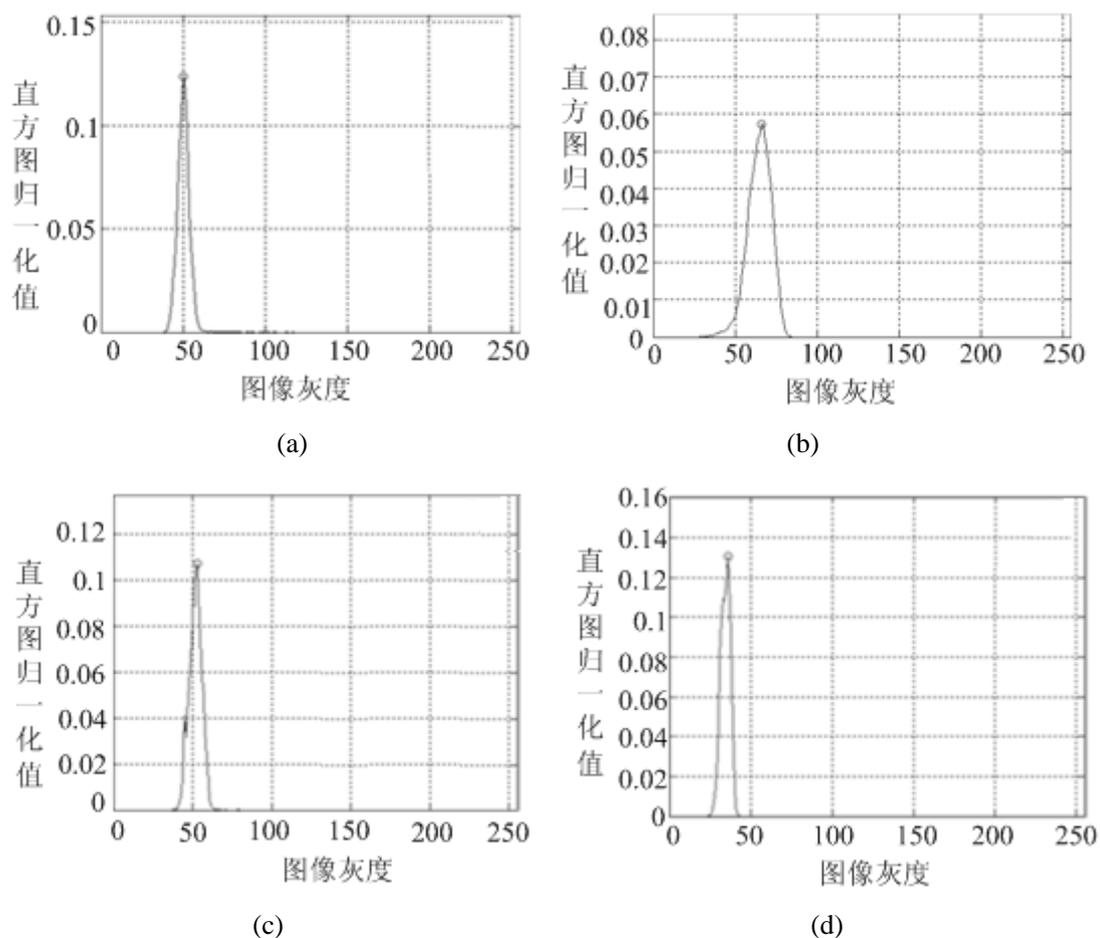


图 3-11 锁定区域的灰度直方图

(a) 锁定区域有裂纹灰度直方图；(b) 锁定区域有氧化铁皮灰度直方图；(c) 锁定区域有划伤灰度直方图；(d) 锁定区域有刻字灰度直方图

根据 2.3.1 节分析的缺陷与钢坯本身散发光强度特征，可以发现如下情况，钢坯锁定区域的灰度直方图的峰值可以代表钢坯本身所在的灰度层，当灰度比峰值小 10 的像素点代表铁屑和划伤所在的灰度层，灰度比峰值大的像素点代表裂纹可能所在的灰度层。所以，通过图 3-11 选取分割的阈值 $T = P - 10$ ，其中 P 是直方图的峰值。

3.3.5 实验结果及分析

经过对上述阈值分割的介绍，通过对钢坯表面附有氧化铁皮的图像为例，对图像进行阈值分割的效果图如图 3-12 所示。

对表面附有铁屑的钢坯锁定区域进行迭代阈值分割、OTSU 分割法及峰值阈值分割的效果图通过图 3-12 显示出来，可以看出图 (b) 与图 (d) 的锁定边缘处较

模糊，且在原图左右两侧质量不太高的地方，无论灰度值较高还是较低的像素点多数被分割成黑色像素，没有很好的将图像进行分割，但图（c）锁定区域的边缘处较清晰，且能将两侧灰度差较小、灰度较暗的部分进行准确地划分出来。虽然OTSU法，即最大类间方差法，在图像分割的方法中错分概率最小，但是从分割效过来看，峰值阈值分割法更适用于本算法中图像的锁定区域分割。

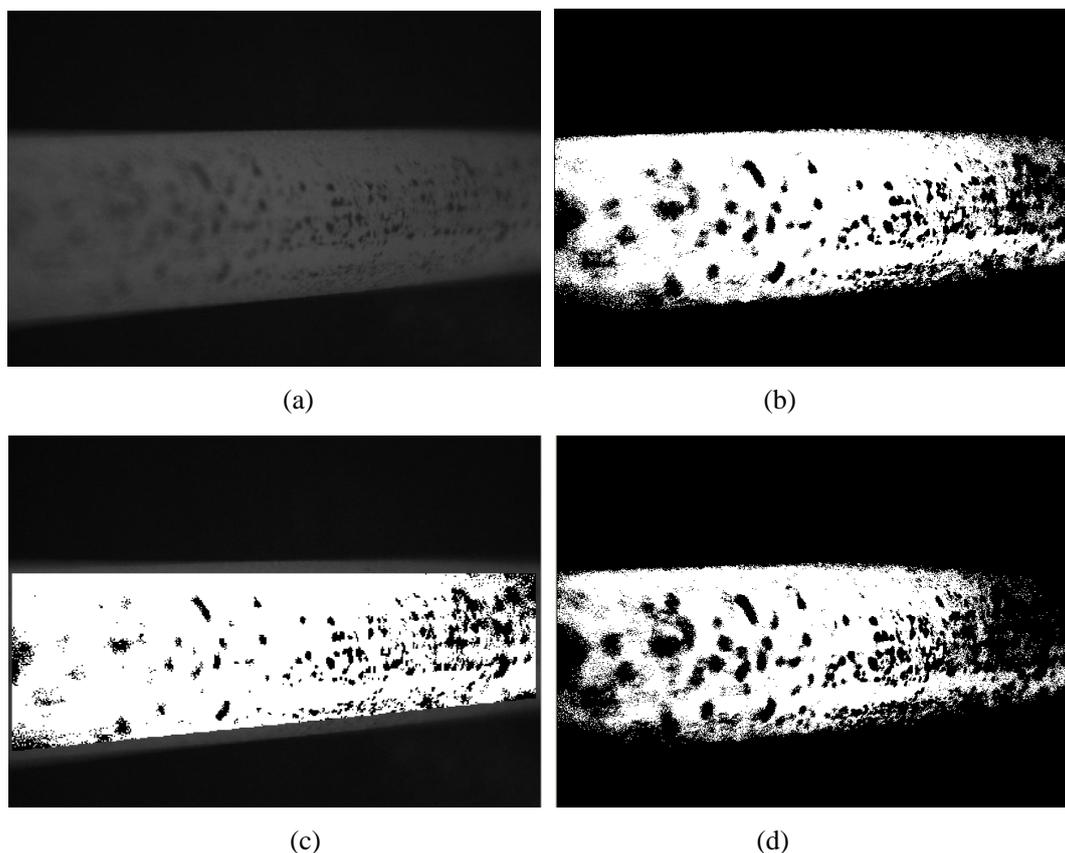


图 3-12 阈值分割效果图

(a) 氧化铁皮原图；(b) 迭代阈值分割结果；(c) 峰值阈值分割结果；(d) OTSU 法分割结果

3.4 图像膨胀

钢坯锁定区域图像经过阈值分割处理后，钢坯表面附着的铁屑所在的铁屑层被获取出来，但是铁屑散发光强的特征，使得铁屑层并没有把铁屑的边缘完全涵盖进来。从而导致铁屑部分边缘被划分到裂纹层，且铁屑的这些边缘与边界之间的灰度差，在进行裂纹决策判断时会产生误判。所以，在图像的阈值分割后，还需要对铁屑层进行灰度膨胀，以便使铁屑的全部边缘都被涵盖进去。

图像膨胀^[52]是数学形态学中的一种基本运算，作用是扩展物体的边界点。膨

胀的基本原理如下,假设 B 表示用作进行膨胀的结构元素,把 B 平移 L 后得到 B_L ,当 B_L 击中 A 时,把此时的 L 点记录下来,符合该条件的所有 L 点组成的集合就是图像 A 被 B 膨胀后的结果。公式如下所示:

$$D(A) = \{L | B_L \uparrow A\} = A \oplus B \quad (3-30)$$

其中 $B_L \uparrow A$ 表示平移后的 B 击中 A ,即有一个点既是 B 的元素也是 A 的元素,图像膨胀的示意图如图 3-13 所示。

在本算法中采用的膨胀结构元素 B 如下所示:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

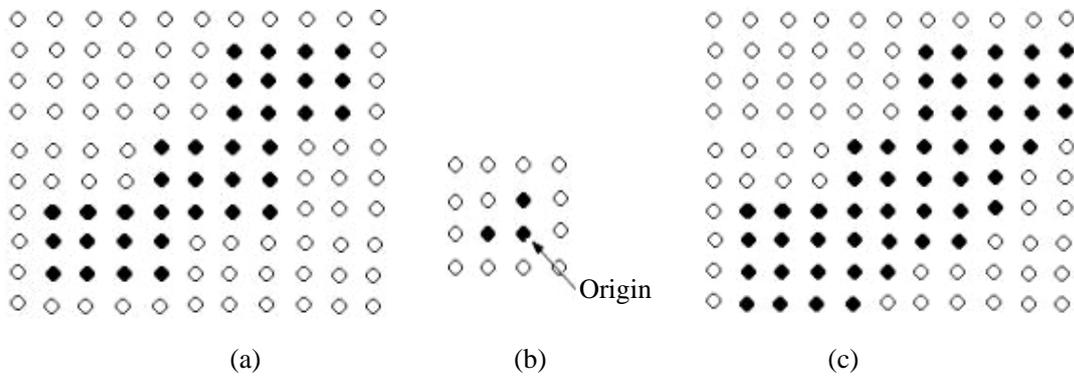


图 3-13 膨胀示意图

(a) 集合 A ; (b) 结构元素; (c) $A \oplus B$

对于图 3-12 中分割出来氧化皮(型钢)以及裂纹图像(中空钢)进行膨胀的效果图如图 3-14 所示,从图中可以发现经过膨胀后,铁屑的边缘被完全涵盖进来。

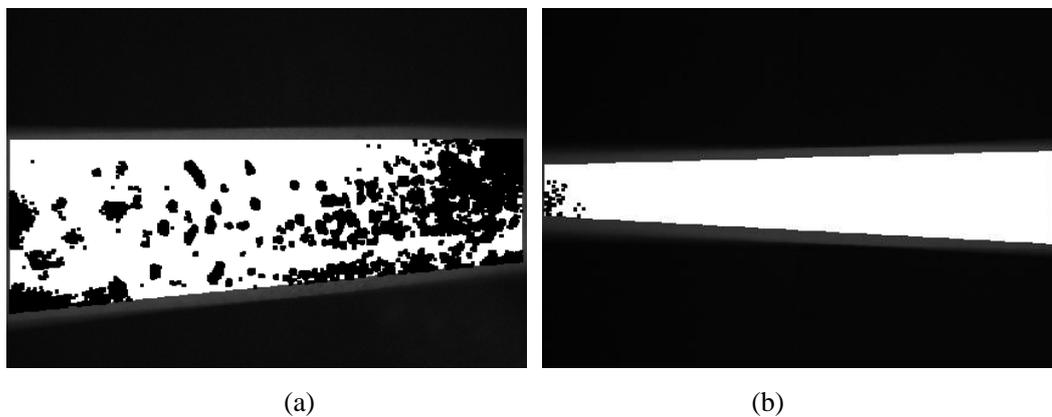


图 3-14 铁屑膨胀的效果图

(a) 型钢铁屑膨胀; (b) 中空钢铁屑膨胀

3.5 本章小结

本章主要介绍了对钢坯缺陷进行决策判断前的处理工作，即钢坯表面图像预处理。对于采集到的钢坯图像是有噪声的，本章提出了图像滤波去噪的多种方法，并对各种滤波处理的结果进行了对比，选择了合适的滤波方法，针对钢坯在上图像与左右图像的位置关系，为了后面算法的方便，对上图像进行了旋转处理，为了避免误判，进行了钢坯区域的锁定，为了将划伤和氧化皮所在的灰度层与裂纹所在的灰度层进行区分，提出多种分割方法，并对各种方法的实验结果进行了对比与分析，最后为了避免漏判，对钢坯图像上的铁屑进行了膨胀处理。

第四章 钢坯表面缺陷决策判断

钢坯表面缺陷决策判断的处理针对于钢坯的锁定区域，经过第三章的图像预处理，附有铁屑和划伤的区域以及灰度层和裂纹所在的灰度层已经被分割开。本系统采用的被动光视觉检测方法，所以钢坯表面有缺陷的部位的灰度就会发生异常变动，在获取到的图像上就会表现出灰度的变化。下面介绍在钢坯的铸造过程中出现的几种缺陷的种类，并针对各种缺陷的特征，提出合适的决策方法。

4.1 钢坯缺陷常见种类

钢坯表面的缺陷种类不仅多样而且复杂。不同种类钢坯表面的缺陷是不同的，例如圆钢与带钢，不是同一条生产线上的钢坯表面的缺陷也不一样，由于工艺参数的不同，即便同一生产线上钢坯也有着各自的表面缺陷。鉴于以上情况，本文特选取了从贵钢钢坯生产线上获取的缺陷图像，对特种钢表面的缺陷进行检测。特种钢就是合金钢，即通过向碳素钢里加入一种或者几种适量的合金，来改变钢的组织结构，进而使钢有不同的特殊性能。获取到贵钢钢坯图片主要涉及到中空钢及型钢，中空钢耐磨、耐腐蚀，可用于修建铁路、国防战备工程的建设及矿山采掘；型钢不同于中空钢的特性在于其韧性较高，耐腐蚀性较差，可用于汽车行业。两种钢本身所具有的特性在其生产的过程中就会影响表面的质量。以下将介绍从贵钢生产线上获取的图片存在的几种缺陷：

(1) 氧化铁皮

两种特种钢表面出现氧化铁皮的不同主要因为耐腐蚀程度不同引起的，中空钢的耐腐蚀性要高于型钢，因此，在钢坯的轧制过程中，中空钢表面的氧化铁皮要少，型钢在该过程中的铁屑要多，如图 4-1 所示。氧化铁皮的特征为：呈鱼鳞状，分布连续，灰度较低。

氧化铁皮主要表现为部分铁屑附着在钢坯的表面，虽然影响了钢坯表面的光滑度，但是并不影响钢坯产品的质量，所以生产出来的表面带有铁屑的钢坯不能算作次品。然而，从图像 4-1 中可以看出，氧化铁皮与图像背景的交界处的灰度差还是很明显的，所以在决策判断时应避免氧化铁皮的误判。解决方法已经在上一章提到。

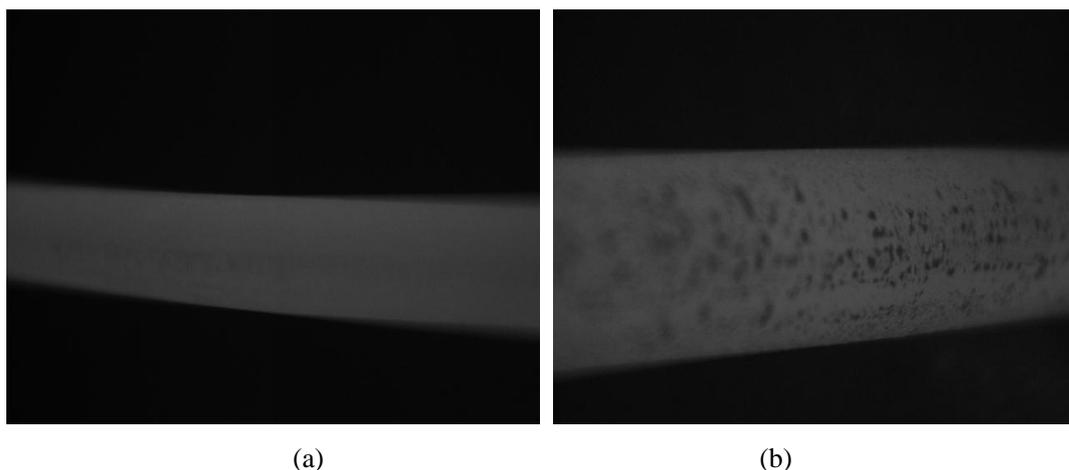


图 4-1 中空钢和型钢的氧化皮图

(a) 中空钢表面的氧化皮图；(b) 型钢表面的氧化皮图

(2) 裂纹

钢坯表面的裂纹缺陷一般有星状、带状裂纹。钢坯的加热问题，例如预热太快，温度不均匀等，另外冷却不足、不均匀都会导致裂纹的产生。带状裂纹一般分布较长，包括横向裂纹与纵向裂纹；面状裂纹则一般分布于局部区域，且区域较小。不同类型的裂纹形状和深度都不一样，以便于人们对裂纹进行更好的算法研究，以及对其进行特征分析。本文所研究的是星状裂纹，如图 4-2 所示。

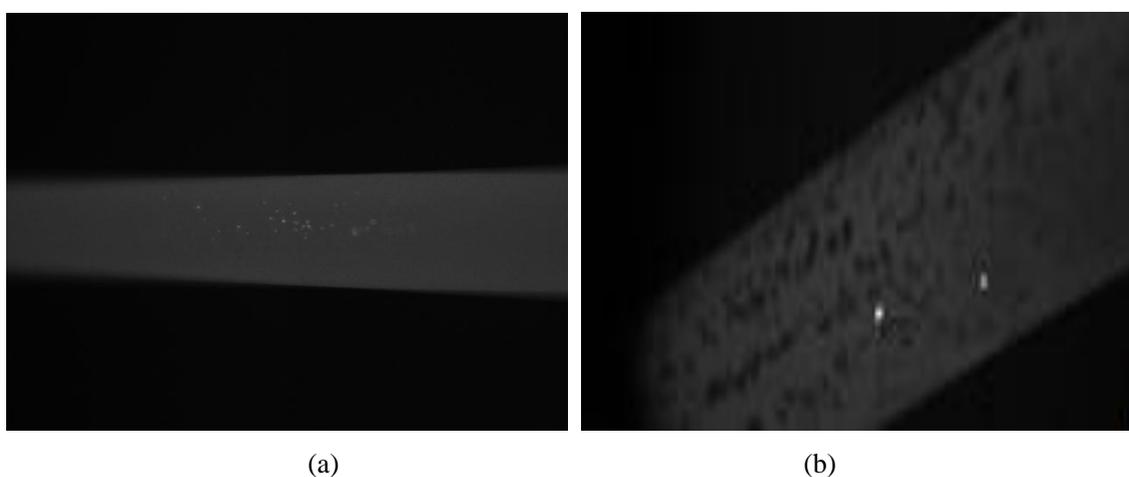


图 4-2 钢坯的裂纹图

(a) 中空钢表面裂纹图像；(b) 型钢表面裂纹图像

钢坯表面的裂纹直接影响着其性能，例如钢坯的抗腐蚀性及抗压能力，所以，裂纹不能出现在钢坯表面，否则会造成各种事故，如果在生产线上检测出钢坯表面有裂纹，应立即停止生产，将带有裂纹的钢坯重新铸制。

(3) 划伤

在钢坯表面的沿着铸造运行方向连续或者不连续的划痕都可看作划伤。划伤可划分为机械性伤害，产生的原因有很多种，具有代表性的有：结晶器不干净，上面有异物，从而划伤铸坯；轧制的速度太快，导致钢坯表面的氧化膜脱落，引起划伤的出现；在钢坯生产线上有相对静止的物体，使得钢坯的上下表面与物体接触，钢坯和物体产生相对滑动，于是在钢坯的表面产生划伤。划伤的是浅痕，与钢坯的轧制方向相平行，且宽度上比较均匀，如图 4-3 所示。

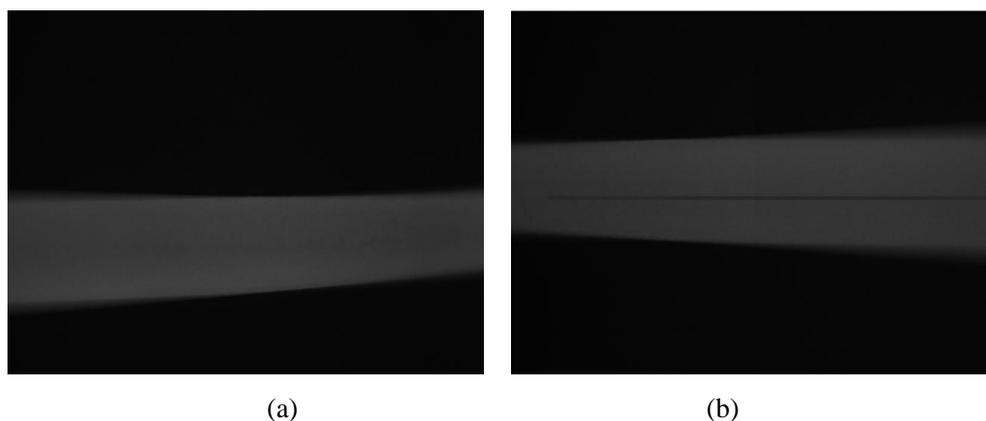


图 4-3 钢坯划伤图

(a) 没有划伤的钢坯；(b) 有划伤的钢坯

刮伤处有可能会存在氧化铁，但是用酸清洗不一定能去除，另外划伤还可能使钢坯开裂。所以应及时将有划过程中伤的在线钢坯进行处理，以免影响到钢坯的生产质量和材质的浪费。

(4) 边部伪缺陷

边部伪缺陷出现的原因主要是贵钢在生产每种型号钢坯的过程中，会在钢坯的某一处刻上公司的名字，从而导致在图像采集的过程中，在上 CCD 像机获取的图像上，刻有字体的地方有时会出现于上图像的边缘。其形状呈长条状，特征类似于裂纹，字体处的灰度值比钢坯本身的高，在图像处理的过程中会被划分到裂纹层，这就会影响对裂纹的判断，从而造成误判。图 4-4 分别是正常的上图像和有刻字的上图像示意图。

实际上，该处并不是真正的缺陷，如果在线缺陷的检测中，将带有刻字的伪缺陷误判成缺陷，检测系统就会发出警报，迫使生产线停止，严重影响钢坯产品的正常生产运行。所以，应避免伪缺陷造成的误检。

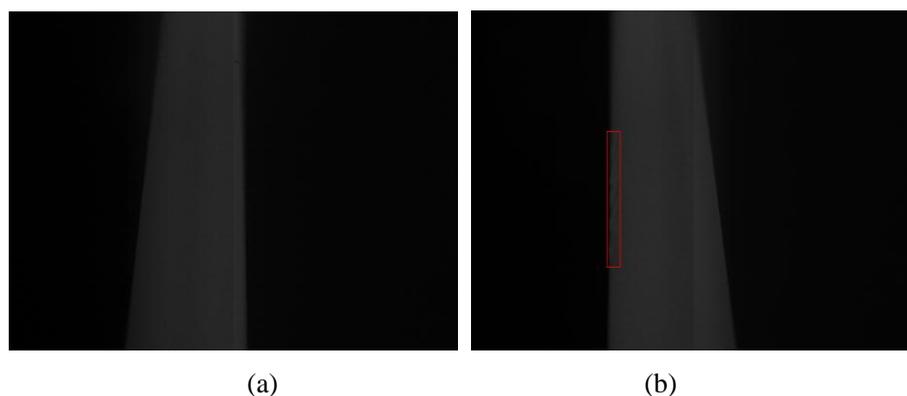


图 4-4 钢坯上图像

(a) 没带刻字的钢坯图像; (b) 带有刻字(左边缘)的钢坯图像

以上介绍的是目前贵钢钢坯生产线上所出现的情况，也是本课题所研究的重点。裂纹及划伤对钢坯成品的性能会有不同程度上的损害，严重影响钢坯产品的质量，如果不能将带有该缺陷的钢坯及时检测出来，流入市场后被应用于生活中，也许会造成意想不到的安全后果，所以这两种缺陷是绝对不允许存在于钢坯的成品之中，对这两种缺陷的检测于是就成了重点。第四种伪缺陷不会影响钢坯成品的质量，但将其误判会影响钢坯的正常生产过程，使生产线无法正常运转，给钢铁企业造成人力和经济上的损失，因此，避免产生误判也尤为重要。

4.2 裂纹提取

由于裂纹所在的灰度层已经分割出来，所以对于裂纹的提取，利用边缘检测方法把裂纹在钢坯表面层识别出来。然后对裂纹的长度、宽度及周长进行统计，方便下面对裂纹进行判断。

4.2.1 边缘检测

由于图像上灰度值相近的像素点会连在一起，从而形成多个不同灰度级区域，各灰度级区域的边缘就是灰度的跃变。边缘检测^[53]就是以灰度跃变为基础，利用微分等方法，来寻找各区域之间的边缘。常见的几种边缘检测方法如下：

1、Robert 检测算子

Robert 检测算子利用局部差分进行边缘的检测，通过局部区域对角线上元素的差值求得的，可以用如下表达式表示：

$$G(i, j) = |f(i, j) - f(i+1, j+1)| + |f(i+1, j) - f(i, j+1)| \quad (4-1)$$

$f(i, j)$ 表示图像中某像素点 (i, j) 的灰度值, $G(i, j)$ 是对该点处理后的灰度值。该边缘检测方法, 对陡峭边缘定位效果好, 却不适用于含有较多噪声的图像, 且容易丢失部分边缘。最常用的 Robert 模板如下:

$$R = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

2、Sobel 检测算子

Sobel 检测算子^[54-55]相对 Robert 检测算子, 考虑了邻域信息。该算子先对图像进行加权平均, 然后进行一阶微分, 对点 $f(i, j)$ 与水平 Sobel 边缘算子进行卷积如下:

$$G_i = f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - 2f(i, j-1) - f(i+1, j-1) \quad (4-3)$$

对点 $f(i, j)$ 与垂直 Sobel 边缘算子进行卷积如下:

$$G_j = f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1) - f(i+1, j-1) - 2f(i+1, j) - f(i+1, j+1) \quad (4-4)$$

对点 $f(i, j)$ 进行 Sobel 边缘算子之后满足:

$$G(f(i, j)) = |\Delta G_i| + |\Delta G_j| \quad (4-5)$$

当 $G(f(i, j))$ 大于某一设定阈值时, 像素点 $f(i, j)$ 被判断成跳跃边缘点。其中 Sobel 算子的水平与垂直方向算子分别如下:

$$S_H = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \quad S_V = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Sobel 算子对噪声有一定的抑制效果, 由于检测的过程中不依赖于边缘的方向, 具有各向同性的特性, 常被用来进行图像边缘的提取。

3、Prewitt 检测算子

Prewitt 检测算子的方法与上面的 Sobel 算子相同, 也是通过图像中的每个像素点与该算子的两个模板进行卷积, 表达式如下:

$$G(i, j) = \left| -f(i-1, j-1) + f(i+1, j-1) - f(i-1, j) + f(i+1, j) - f(i-1, j+1) + f(i+1, j+1) \right| + \left| -f(i-1, j-1) - f(i, j-1) - f(i+1, j-1) + f(i-1, j+1) + f(i, j+1) + f(i+1, j+1) \right| \quad (4-7)$$

把 $G(i, j)$ 与设定好的阈值进行比较, 当 $G(i, j)$ 大于阈值时, 判定该像素点为目标的边缘点。

Prewitt 检测算子的水平边缘与垂直边缘模板分别如下:

$$P_H = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad P_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

4、Log 检测算子

Log 检测算子结合了高斯平滑与拉普拉斯锐化两个过程, 先进行高斯去噪, 后进行拉普拉斯边缘检测。Laplacian 算子定义为:

$$\nabla^2 f(i, j) = \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial i^2} + \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial j^2} \quad (4-9)$$

对图像的像素点 $f(i, j)$, 通过对该像素点在 X 轴和 Y 轴方向上的二阶微分求和来求取 Laplacian 算子, 形式如下:

$$\nabla^2 f(i, j) = f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j) \quad (4-10)$$

常用的 Log 算子模板:

$$L = \begin{bmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -4 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

5、Canny 检测算子

Canny 检测算子^[56-57]是一种在抗噪声及定位两者之间的最佳折衷方法。Canny 检测的基本思想包括两步: 首先选择合适的 Gauss 滤波器对图像进行去噪, 然后通过非极值抑制方法处理得到图像的边缘。具体检测步骤如下:

(1) 利用 Gauss 滤波器对图像进行滤波

$$H(i, j) = f(i, j) * g(i, j) \quad (4-12)$$

公式 4-12 中, $f(i, j)$ 是原图像灰度, $g(i, j)$ 是 Gauss 滤波器, $H(i, j)$ 是去噪之后的图像灰度。

(2) 计算梯度的幅值 $\phi(i, j)$ 与方向 θ_ϕ

设一阶差分卷积模板为:

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

幅值和方向如下：

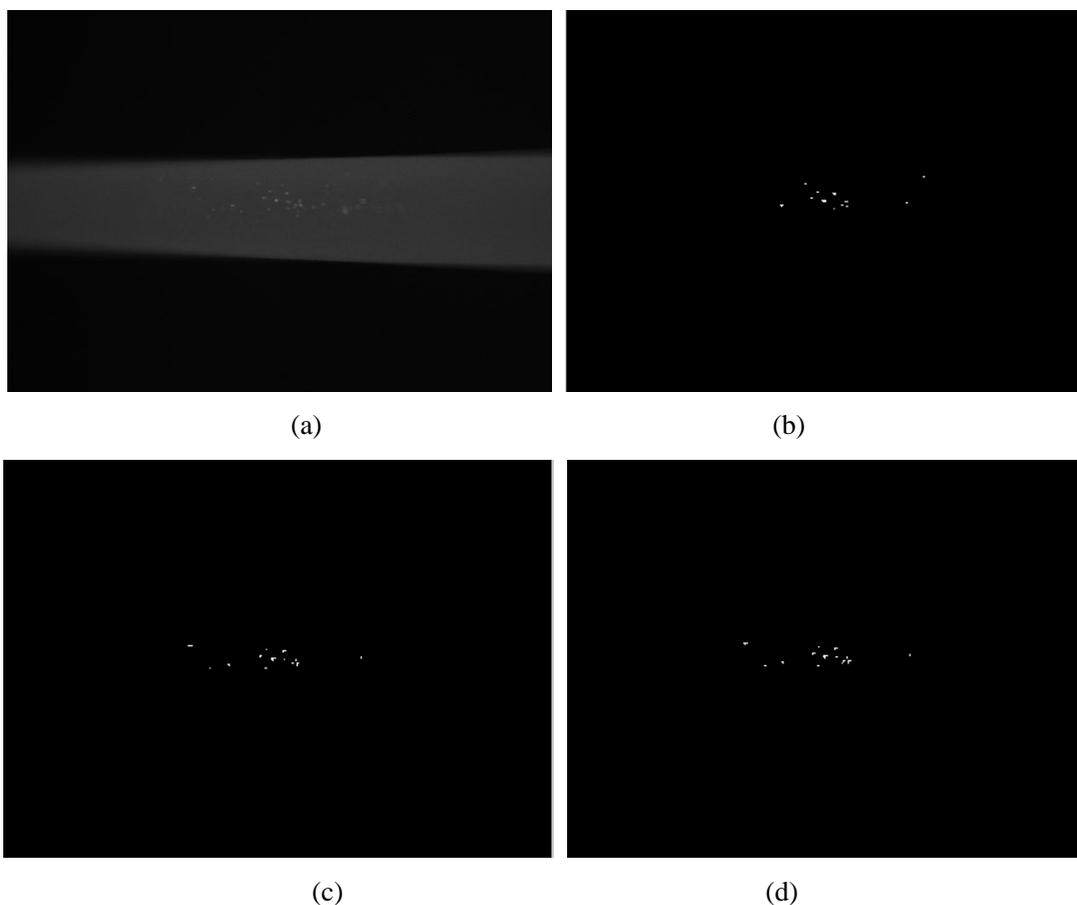
$$\varphi(i, j) = \sqrt{(f(i, j) * H_1)^2 + (f(i, j) * H_2)^2} \quad (4-14)$$

$$\theta_\varphi = \tan^{-1} \frac{\varphi_2(i, j)}{\varphi_1(i, j)} \quad (4-15)$$

(3) 对上一步骤中的幅值进行非极大值抑制处理，保留局部梯度最大点，对于局部非极大值的点进行置零处理，从而确定目标边缘。

(4) 利用双阈值进行边缘的检测及连接，假设两个阈值 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 < T_2$ ，根据这两个阈值分别对图像进行边缘检测，得到图像 $N_1(i, j)$ 和 $N_2(i, j)$ 。因为边缘图像 $N_2(i, j)$ 使用的阈值较大，所以假边缘较少，但是也会有间断。所以在图像 $N_2(i, j)$ 的端点处，通过对 $N_1(i, j)$ 的 8 邻点位置进行寻找可以连接到轮廓上的像素点，不断在 $N_1(i, j)$ 进行边缘的搜索，一直到将 $N_2(i, j)$ 连接起来。

通过对上述 5 种边缘检测方法的介绍，对中空钢坯锁定区域进行裂纹边缘检测后将裂纹灰度置为 255，非裂纹灰度置为 0，效果图如图 4-5 所示。



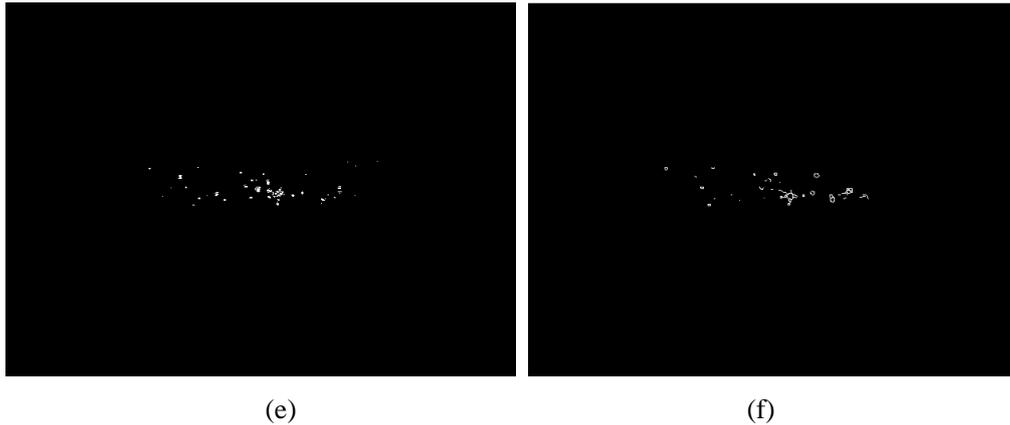


图 4-5 裂纹边缘检测图

(a) 原图像；(b) Robert 边缘检测后图像；(c) Sobel 边缘检测后的图像；(d) prewitt 边缘检测后的图像；(e) Log 边缘检测后的图像；(f) Canny 边缘检测图像

从图 4-5 可以看出，不同的算法检测出来的裂纹存在很大差异。Robert 算子定位精度虽然高，同时受噪声影响较大，Sobel 算子与 Prewitt 算子可以滤除部分噪声，但是也平滑了部分真正的边缘，但是图 (c) 与图 (d) 相比，Sobel 算子的平滑边缘较小，效果要好，Log 算子也容易受噪声影响，检测出来的边缘掺杂着噪声，Canny 算子虽然边缘定位较好，抗噪能力强，但是从图(f)中可以看出当裂纹紧挨着的时候，检测出来的边缘会连在一起，造成裂纹检测的不准确性。另外，根据实际生产要求，尽量要减小误判的几率，所以从算法的简单度、准确度和实时性等多方面考虑，本算法采用 Sobel 算子对钢坯裂纹进行提取。钢坯锁定区域裂纹的提取算法用流程图表示如下：

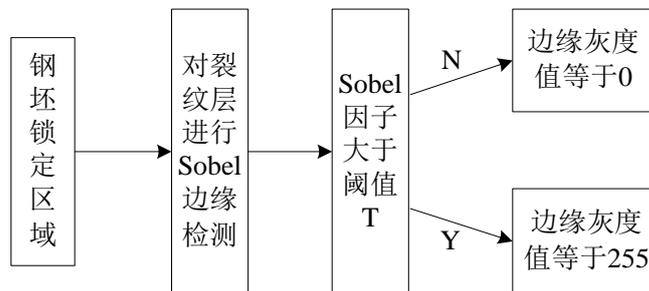


图 4-6 裂纹提取流程图

在图 4-6 的流程图中，阈值 T 的选取关系到裂纹判断的准确性，如果 T 选取的太小就会使不是裂纹的像素点划分进去，如果 T 选取太大，会使裂纹的像素点

漏掉，根据实际的要求，此处的 T 的值设为 73。此外将裂纹提取后的图像处理成二值图像的目的是，方便后面对锁定区域的裂纹进行参数统计。对于型钢图像中的裂纹检测如图 4-7 所示。

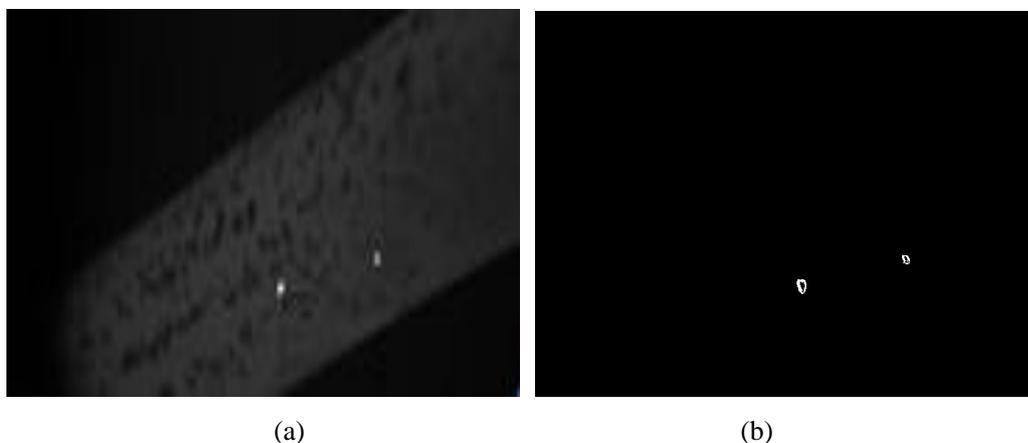


图 4-7 型钢图像裂纹检测图

(a) 型钢图像裂纹图；(b) 型钢图像裂纹提取图

由于划伤进行检测时需要二值化图像，所以本算法中将氧化铁皮层进行 Sobel 边缘检测，然后根据 Sobel 因子大于某一阈值时，将边缘灰度设置为 255，否则灰度值为 0。铁屑与划伤进行 Sobel 边缘检测后的二值化图像如图 4-8 所示。

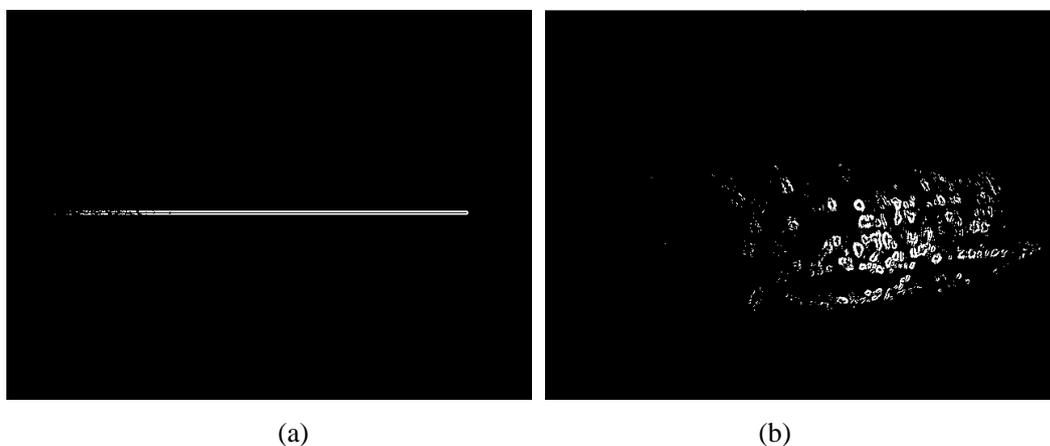


图 4-8 划伤及铁屑经过 Sobel 变换二值化图

(a) 划伤进行 Sobel 变换二值化图；(b) 铁屑进行 Sobel 变换二值化图

4.2.2 裂纹参数计算

对于提取出来的裂纹边缘，除了要计算裂纹的周长，还要对其长度和宽度进行计算，下面是计算裂纹参数的流程图：

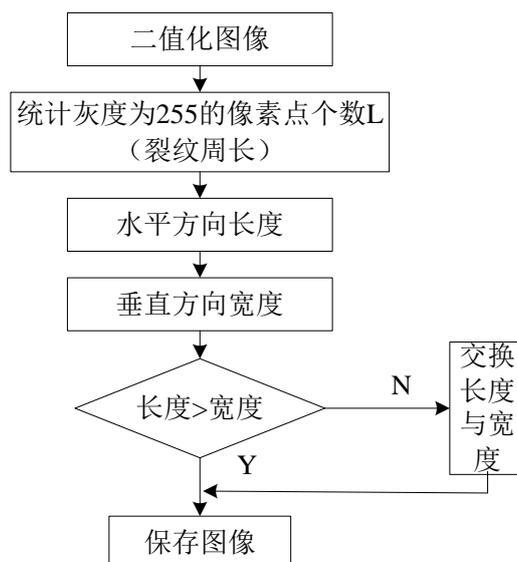


图 4-9 裂纹参数流程图

通过上一步的裂纹提取已经将钢坯表面的裂纹检测出来，并且把裂纹边缘的灰度值设定为 255，通过对锁定区域内的灰度值为 255 的像素点的个数进行统计，令统计的个数为 L ，即为裂纹的周长。

对于裂纹的长度计算，利用锁定区域的裂纹的灰度值为 255 这一特点，对裂纹上所有的像素点进行扫描，将裂纹在水平方向最右端及最左端的像素点坐标记录下来，两点之间的距离即为裂纹的长度。同理，通过计算裂纹垂直方向的像素坐标最大值及最小值，求得裂纹的宽度。此外，由于裂纹方向的不确定性，为了确保裂纹的长度大于宽度，要对刚才计算出来的长度及宽度进行比较，将两者中的较大值作为裂纹长度，较小值就是裂纹的宽度。

对图 4-5 和图 4-7 中的裂纹进行周长计算，得到的结果如图 4-10 所示：

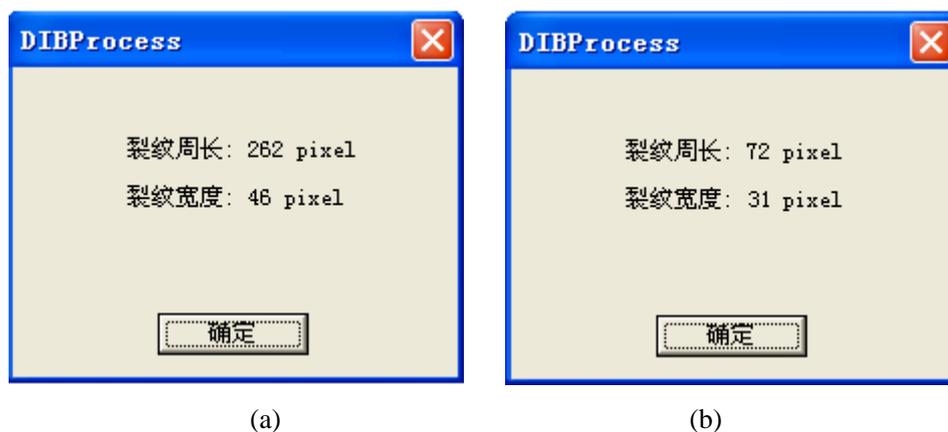


图 4-10 裂纹检测显示图

(a) 中空钢图像裂纹检测；(b) 型钢图像裂纹检测

4.3 划伤提取

经过图像的分割处理之后，铁屑和划伤被分到同一灰度层，即氧化皮层。在对划伤与氧化铁皮进行识别与分类时，要根据两者在形态上的特征，由于铁屑形状呈鱼鳞状，划伤则是呈直线状分布，所以可以利用 Hough 直线检测技术将划伤检测出来，该处理是针对于钢坯的锁定区域进行的。

Hough 变换^[58-59]利用图像空间与参数空间的点-线对偶性，即将图像空间上有一点关系的像素点聚集在参数空间上，并进行累加与统计，最后找出峰值点，从而确定图像空间中特定特征的相关参数。由于图像空间中的点映射到参数空间是一条直线，在图像空间上位于同一直线上的点，表现在参数空间上是一组直线交与一点。假设极坐标下的一条直线表示如下：

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4-16)$$

上式中 ρ 表示直线到原点的垂直距离， θ 表示直线 ρ 与 X 轴之间的夹角，且有 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ，如图 4-11 所示。假设极坐标下共线的两个点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) ，映射到参数空间后变成两条相交与点 (ρ_0, θ_0) 的两条正弦曲线。如图 4-12 所示。

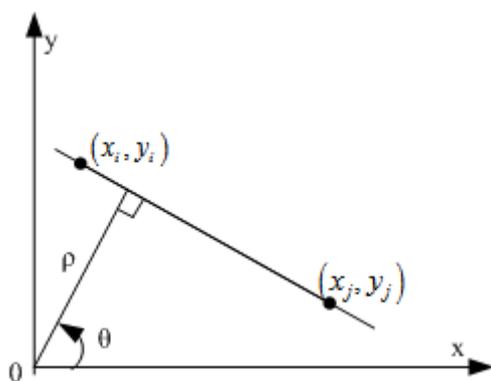


图 4-11 直线的参数式表示

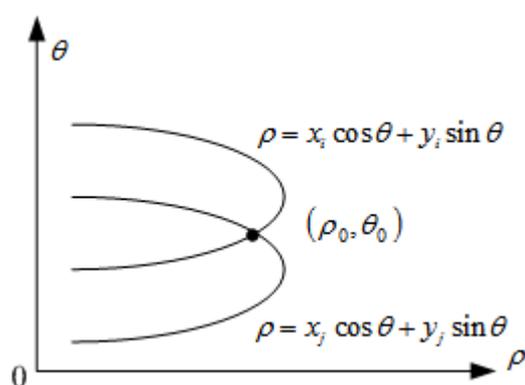


图 4-12 笛卡尔坐标映射到参数空间

Hough 变换直线检测的具体步骤如下：

- (1) 初始化一个数组，作为关于 $\rho-\theta$ 空间的累加器。
- (2) 对二值化图像（背景为黑色，前景为白色）进行逐行扫描，当遇到白色像素点时，极坐标域对应的累加器加 1。
- (3) 找出当前极坐标域中峰值最大者，并记下该峰值点的坐标。
- (4) 把步骤 (3) 中的最大峰值像素点和邻近范围的累加器清零。
- (5) 若已经找到的峰值个数小于设定的直线条数，就转到步骤 (3)；否则所找到的直线的参数信息。

对图像 4-8 经过 Hough 变换直线检测后，划伤被检测出来，如图 4-13 所示。

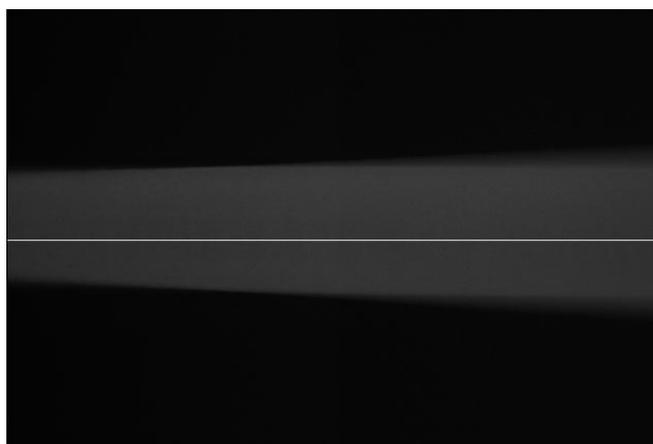


图 4-13 划伤检测图

4.4 钢坯表面缺陷判断

经过 Sobel 边缘检测和 Hough 直线边缘检测已经把裂纹和划伤已经检测出来，然后就是实现裂纹和划伤的自动识别，这就需要设定两个阈值 $T1=20$ 和 $T2=65$ ，当裂纹周长大于 $T1$ 时，就判定为有裂纹存在，如果划伤的长度超过 $T2$ ，就判定钢坯表面有划伤。图 4-14 是检测结果。

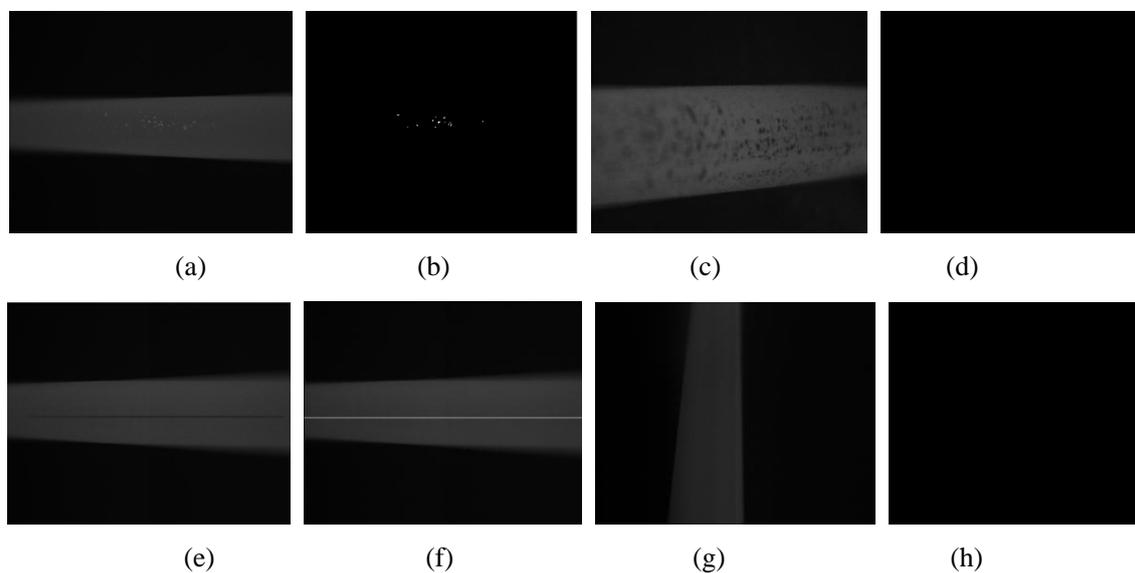


图 4-14 检测结果

(a) 裂纹图；(b) 检测出来裂纹；(c) 氧化皮图；
 (d) 氧化皮检测结果；(e) 划伤图；(f) 检测出划伤；
 (g) 刻字-上图像；(h) 刻字图检测结果

从图 4-14 中可以看出，氧化铁皮和上图像上面的刻字没有被误判成缺陷，裂纹和划伤被检测了出来。说明该算法能够将钢坯表面的缺陷进行识别与分类，且能够避免氧化铁皮和刻字的带来的误判。

4.5 本章小结

本章从钢坯表面缺陷决策判断方法出发，首先介绍了钢坯缺陷的常见种类，然后针对钢坯裂纹的提取方法进行了实验结果比较，选用基于 Sobel 边缘检测法对裂纹进行了识别，根据划伤呈直线分布，氧化铁皮呈鱼鳞状分布的特点，采用 Hough 变换直线检测方法将划伤与氧化铁皮识别开来。最后根据缺陷标准对检测出来的缺陷进行判定，且对于各种情况给出了实验结果，从而验证了算法的高效性。

第五章 裂纹检测系统的软件设计

钢坯表面缺陷的在线检测系统，除了像机获取高质量图像、快速简单的钢坯缺陷检测算法外，软件系统也是对高速铸造钢坯有准确检测效果的关键因素。所以，稳定快速的软件设计是根本，其直接影响着钢坯缺陷检测系统能否运行及检测效果。本章根据算法的要求，首先对软件需求进行了分析，然后介绍了软件设计的框架，最后对软件方案进行了具体分析。

经过多次对钢坯的在线检测实验，系统的软件及算法的阈值选取进行多次的修改后，该钢坯缺陷检测系统已经可以在现场稳定工作，且能够将钢坯铸造过程中的缺陷及时检测来。

5.1 软件系统

钢坯裂纹的在线检测系统主要应用于钢坯的生产现场，美国 HotEye 系统采用置入就开始运行的方式，另外，在钢坯生产过程中，是生产线上的工人使用该检测系统，所以该系统在在软件设计的重要特点就是，需要调整的参数要少，界面简洁、明了、易操作。

5.1.1 软件需求分析

钢坯裂纹检测系统的软件开发是在 VC++6.0 的环境下进行的，整个软件设计是基于 MFC 平台完成的，即微软基础类库。MFC 是 WinAPI 和 C++ 的结合，是一套面向对象的函数库，提供了强大的应用程序接口编程。Document/View 结构的提出，使得基于 MFC 编程变得有章可循。Document 代表了文档类 (CDocument)，而 View 代表了视图类 (CView)，CDocument 负责对文件数据读写、存取和处理；CView 负责将文件数据的结果内容输出到显示装置（显示器、打印机等）。通过 Document/View 结构 MFC 很方便地实现了对数据处理和显示的分离，便于面向对象模块化编程，提高了编程的效率，降低了数据维护的成本。

对于裂纹的检测系统，在软件设计方面主要完成两个方面的需求：

(1) 图像的采集。在图像的采集方面，本系统采用了 3 个 CCD 像机进行图片的获取，像机的触发方式采用的外部触发，所以首先对 CCD 像机的软件设置及初始化是必不可少的。

(2) 图像的处理。关于裂纹的检测，不仅要检测出来裂纹及划伤，还有对裂纹的长度、宽度、周长、处理之后的图像（对缺陷部位进行标注）、图像拍摄时间、

钢坯种类及型号等基本信息进行保存，以便后期的查看。

5.1.2 软件框架设计

基于上面的讲述，了解了软件系统的开发环境及功能需求。下面重点讲述基于 MFC 的 Document/View 结构，利用单文档界面 (SDI, Single Document Interface) 进行系统开发的框架设计，整个框架中所使用到的类及结构关系如图 5-1 所示。

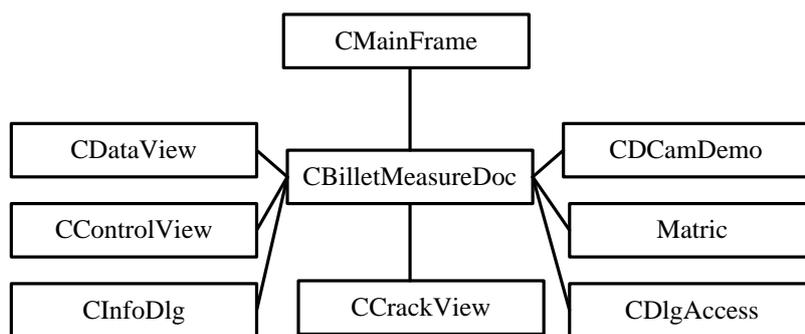


图 5-1 裂纹检测系统中所用类及结构关系

软件系统所用的类包括 CView 类的派生类、CDocument 类的派生类以及 CDialog 类的派生类。其中图 5-1 中，CView 类的派生类包括：CCrackView、CControlView 和 CDataView；CDialog 类的派生类包括：CInfoDlg 和 CDlgAccess；CDocument 类的派生类包括：CBilletMeasureDoc。CCrackView 类的主要作用是用于显示监测出裂纹的钢坯图像；CControlView 类的主要作用是进行控制、监测功能，包括钢坯类型的选择、控制程序的启动与暂停、像机温度和帧率的实时监控等，CDataView 类的主要作用是实时显示钢坯轮廓的参数信息以及对运行期间裂纹的统计；CInfoDlg 对话框主要作用是操作者输入要检测的钢坯类型与型号、生产误差等钢坯基本信息；CDlgAccess 对话框主要作用是将检测出的裂纹信息导入到数据库，并开发了配套的查询界面可随时查看裂纹信息，另外还可通过裂纹信息查看相应的裂纹图像。CBilletMeasureDoc 即文档类，其重要作用是对数据的读取和处理，包括标定参数等数据的读取、管理和交换，多线程程序的构造，图像处理算法的编写实现等。

CMainFrame 类即主框架类，在本软件系统中主要作用是在其框架上利用 MFC 自带的 CSplitterWnd 类对窗口的分割；另外，CDCamDemo 类为摄像机厂商提供，实现了对摄像机的基本操作与控制函数，可以在此类的基础上进行二次开发实现特定的功能；Matric 类是自行实现的一个类，其包含多种矩阵算法的实现，完成矩阵的基本数学运算。

5.1.3 软件流程图设计

图 5-2 是钢坯检测系统的软件工作流程,启动程序后,首先对系统进行初始化,然后对界面对话框上的基本信息进行设置,开始载入一帧图像,根据设计好的功能要求对获取到的图像进行处理。

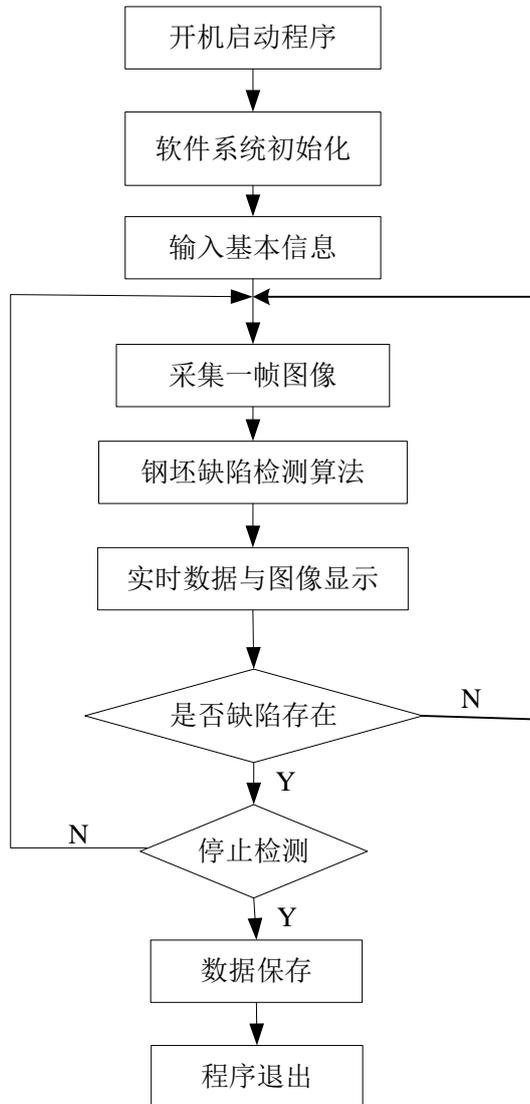


图 5-2 软件运行流程图

检测软件主要完成钢坯表面缺陷的检测与识别,在获取到一帧图像后会进行缺陷检测算法处理,并把处理后的图像信息实时显示出来,如果检测没有检测出缺陷,会进行下一帧图像的采集,继续进行检测,如果检测出缺陷的存在,系统会把缺陷的有关数据保存起来,并且关闭生产线和程序,防止次品的批量生产。检测结束后,停止图像的采集,保存检测的数据,最后程序退出。

5.1.4 软件方案介绍

由于在检测系统中，采用了三个 CCD 像机对生产中的钢坯进行全面拍摄，所以为了保证像机拍摄的是同一时刻的钢坯图像，检测系统利用了像机的外部软件触发方式。此外，对于钢坯图像的缺陷决策判断，必须依据三幅钢坯图像的共同处理结果，否则就导致裂纹等缺陷的漏判，为满足以上要求，在软件设计上应用了线程同步技术，从而保证图像处理的同步性。

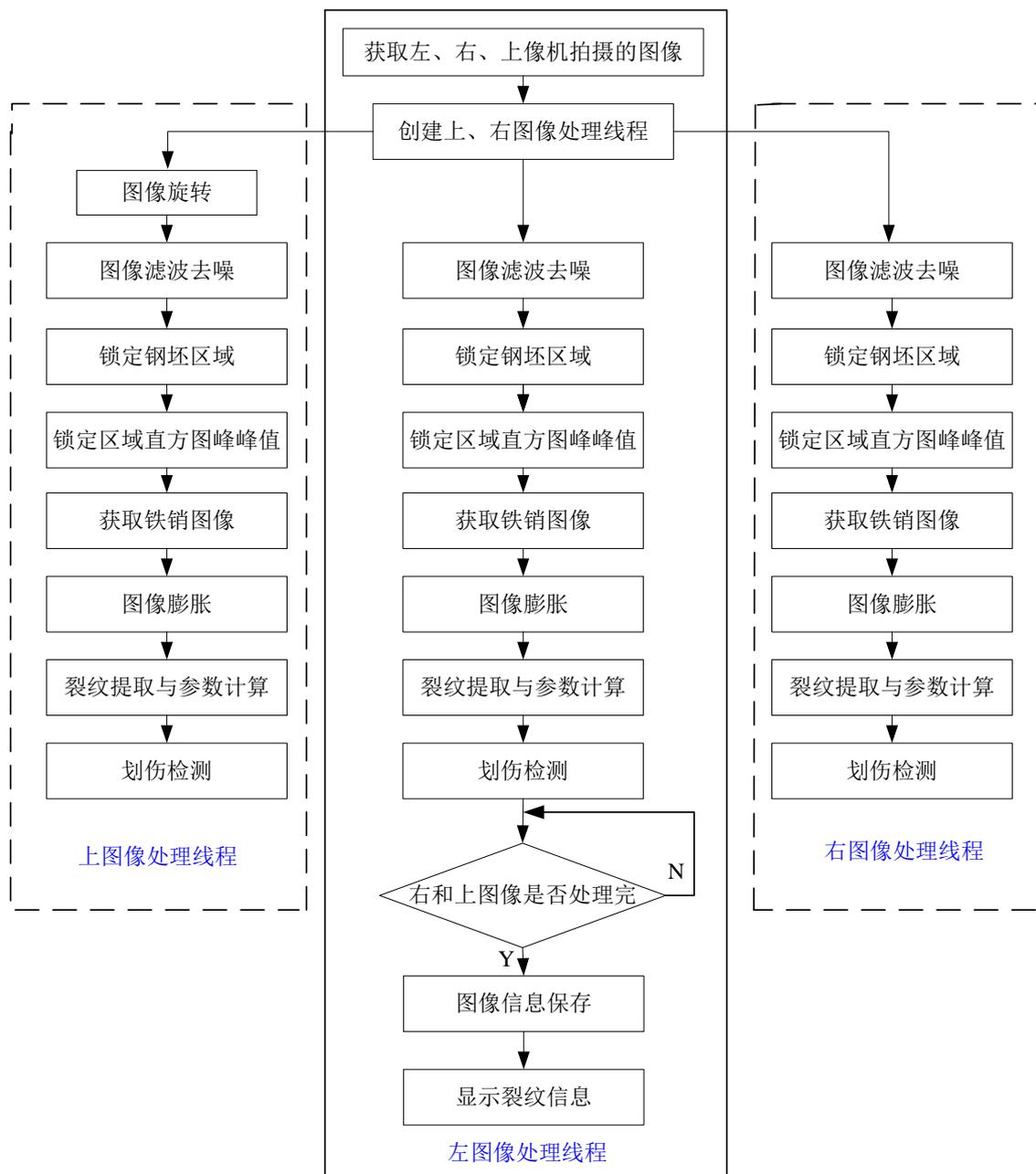


图 5-3 钢坯图像处理线程流程图

对于像机触发的过程原函数都封装在类 CDCamDemo 中，调用的函数形式如下：

由于像机默认的是内部触发方式，所以首先要对像机的触发方式进行更改，函数如下为

```
m_pMonoSerial->SetTriggerMode(1);
```

像机的正常工作电压为 3.3V-24V 之间，最佳电压为 5V，所以此处选用 TTL 电平产生方波信号，函数如下：

```
m_pMonoCamera->SetTriggerSource(TRIGGER_SOURCE_EXT);
```

信号的触发方式有电平触发与边沿触发，本像机选用上升沿触发形式

```
m_pMonoCamera->SetTriggerActivation(TRIGGER_ACTIVATION_
RISINGEDGE);
```

设置好触发形式后，根据钢坯的生产速度，还要对像机的工作频率进行设置，为了满足不同环境的需求，设置脉冲的宽度为可调模式，函数如下：

```
m_pMonoCamera->SetExposureMode(EXPOSURE_MODE_TIMED);
```

对于像机曝光时间，此处设置为 70 微妙，设置函数如下：

```
m_pMonoCamera->SetExposureTime(70);
```

对像机的配置完成之后，接着会对钢坯图像进行采集，对于获取到的上、左、右三幅图像的处理已在图 5-3 中给出了大致的处理流程，下面将对具体的图像线程同步处理过程及函数的调用情况作详细的介绍。

线程同步时协同步调，不是同时进行的意思，而是按照原来的预定有次序的进行。在进行一个功能调用时，调用不能退出，除非已经处理完，且其他的线程也不能调用这个方法。在钢坯上、左、右三幅图片进行处理的过程中，各幅图像线程里面涉及到的中间敏感数据不能被另外的线程进行访问，从而确保中间的处理数据在任何时候只有一个线程访问，保证图像处理结果的准确性。

在进行钢坯检测过程中，首先在左图像线程里创建两个子线程，完成右、上图像的裂纹检测，函数形式如下：

```
HANDLE CrackProcR=CreateThread(NULL,NULL,CBilletMeasureDoc::
ImageCrackProcR,this,NULL,NULL);
```

该函数是创建右图像线程，并将右像机线程句柄 CrackProcR 返回。

```
CloseHandle(CrackProcR);
```

该函数表示关闭右图像线程的句柄。

```
HANDLE CrackProcUp=CreateThread(NULL,NULL,CBilletMeasureDoc::
ImageCrackProcUp,this,NULL,NULL);
```

该函数是创建上图像线程，CrackProcUp 是返回上像机线程的句柄。

CloseHandle(CrackProcUp);

该函数表示关闭上像机线程句柄。

线程创建完之后，要对各个线程中的图像进行缺陷的检测，下面是上图像线程处理过程中所用到的函数：

void CBilletMeasureDoc::ImageProcessCrazeUp();

整个上图像处理过程都在此函数中进行。

GetThreadCUp();

该函数表示获取上图像线程的所有权。

TuXiangLvBo(m_pDataCUp);

该函数是对获取到的上图像进行滤波处理。

VirticalToHorizontal(m_pDataCUp);

通过该函数对上图像进行顺时针旋转 90 度角，方便上、左、右三幅图像在进行钢坯区域锁定时，可以调用同一个函数，简化程序的复杂度。

CrackRegion* m_pSobleRegion = GetSobleRegion(m_pDataCUp1);

该函数是对钢坯图像进行锁定区域，CrackRegion 是一个点坐标结构体，用来记录锁定区域四个顶点的坐标，m_pDataCUp1 是进行旋转 90 度的上图像。

BYTE m_iHistPeak = GetHistPeak(m_pDataCUp1,m_pSobleRegion);

该函数是对锁定区域进行灰度直方图统计，返回值 m_iHistPeak 是直方图的峰值，m_pSobleRegion 是锁定的区域。

BYTE*m_pIronExpand=GetIronExpandImage(m_pDataCUp1,m_pSobleRegion,
m_iHistPeak);

该函数实现两个过程，即利用 m_iHistPeak-10 作为阈值进行图像的分割，以及对二值化图像的黑色铁屑进行膨胀处理。

BYTE*m_pSobleImage=GetSobleImageUP(m_pDataCUp1,m_pIronExpand,
m_pSobleRegion);

该函数完成对裂纹层的裂纹提取，将提取后的图像保存到 m_pSobleImage 中。

m_iCrackLengthUp = GetCrackLengthUP(m_pSobleRegion,m_pSobleImage);

该函数是对裂纹长度、宽度、周长进行计算。

m_HoughLengthUp = HoughUp(m_HoughUp);

该函数完成对划伤长度的统计。

ReleaseThreadCUp();

上图像缺陷算法检测完之后，要通过该函数对上图像线程的所有权进行释放。

右图像线程的处理过程相对于上图像线程，除了不需要进行图像的旋转之外，其他的函数调用一致。等到上图像与右图像两个线程的处理结束，以及左图像线程中的裂纹检测算法进行完之后，还需要进行处理图像信息的保存与显示，这部分是在左图像线程中进行的，具体函数如下所示：

```
GetThreadCUp();  
ReleaseThreadCUp();  
GetThreadCR();  
ReleaseThreadCR();
```

以上四个函数是确保上图像线程与右图像线程的图像处理过程已经结束，防止未进行完的线程提供不准确的信息，避免三幅图像线程的不同步性。

在确保图像处理过程真正结束之后，开始对处理好的图像进行信息保存，保存时首先要判断裂纹的周长与设定裂纹标准阈值之间的大小，若大于阈值，则进行保存。对图像信息保存完和图像显示完后，一帧图像就处理结束，这时要释放线程资源，进行下一帧图像的处理，释放线程函数为：

```
ReleaseSemaphore(m_semThreadO,1,NULL);
```

5.2 本章小结

本章通过钢坯检测系统的软件设计的重要性，根据实际使用要求对软件的需求进行了分析，介绍了软件的框架设计以及软件设计流程图，最后对检测系统的软件方案进行了详细的描述。

第六章 裂纹检测试验结果

前几章对裂纹检测系统作了详细的介绍，对于系统的检测效果以及实用价值，本章将通过实验检测结果及现场检测结果进行分析。为了验证检测系统的实用性，多次去贵钢钢坯生产现场对钢坯裂纹在线检测系统进行测试。根据最近几次的现场测试情况，该检测系统已经能够完成钢坯表面缺陷的检测。

6.1 实验检测结果

在实验检测过程中，主要根据贵钢生产的钢坯样品（圆钢、六角钢）进行实验。为了验证钢坯检测系统的准确性，对于有表面缺陷的钢坯，利用高温乙炔焊机对 $\phi 40$ 钢坯进行加热，图 6-1 为检测效果图。

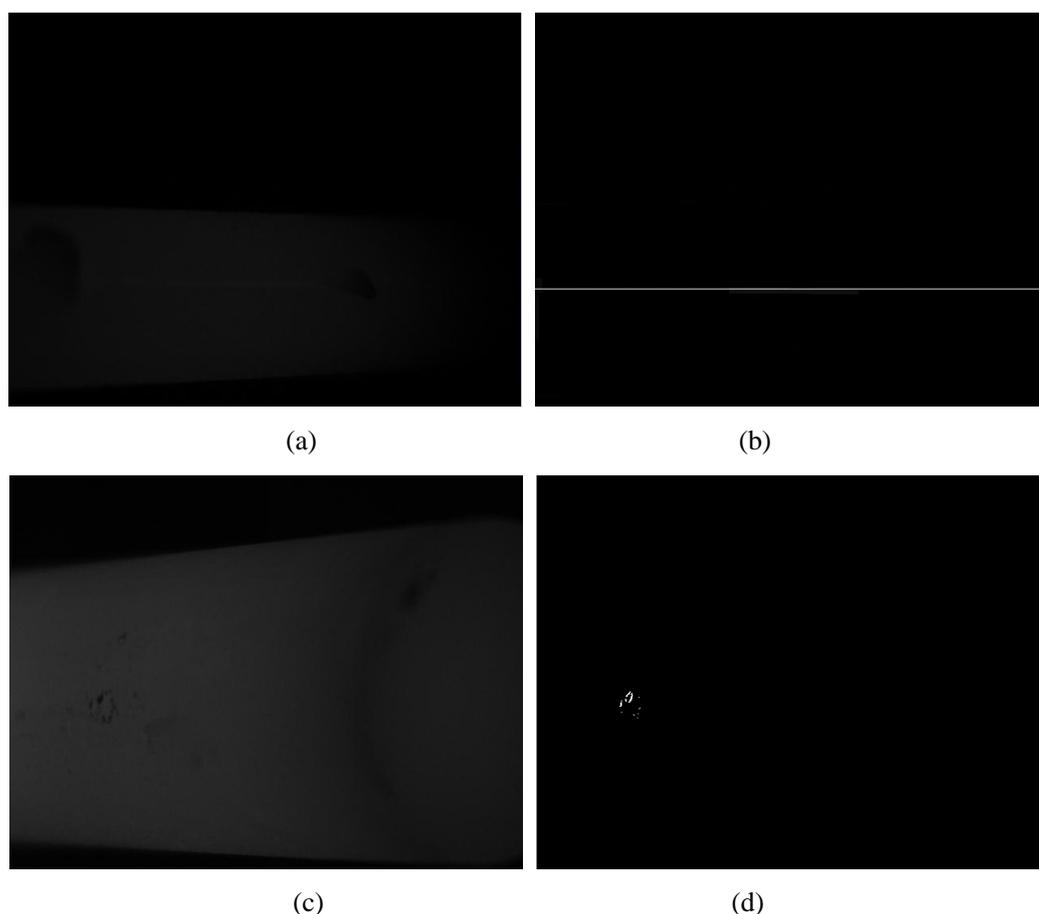


图 6-1 实验高温钢坯缺陷检测效果图

(a) 加热划伤钢坯示意图；(b) 划伤钢坯检测效果图；(c) 加热裂纹钢坯示意图；(d) 裂纹钢坯检测效果图

通过高温乙炔焊机对 $\phi 40$ 和 $H22$ 两种型号钢坯进行高温加热模拟热轧圆钢棒线现场生产情况，对表面存在的裂纹、划伤、氧化铁皮和刻字图像分别选取 30 幅进行测试，结果如表 6-1 所示。

表 6-1 $\phi 40$ 和 $H22$ 型号钢坯缺陷的检测结果

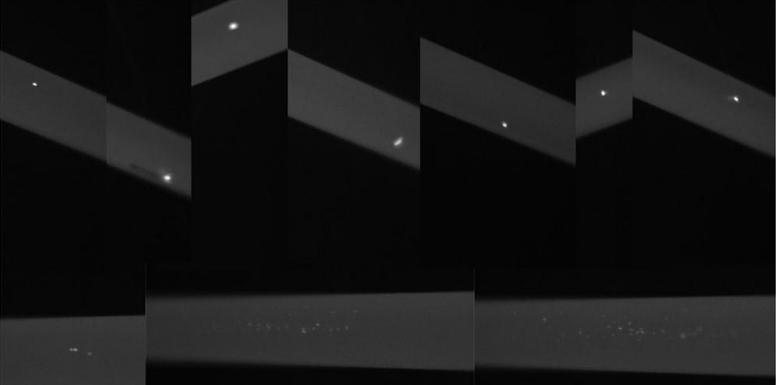
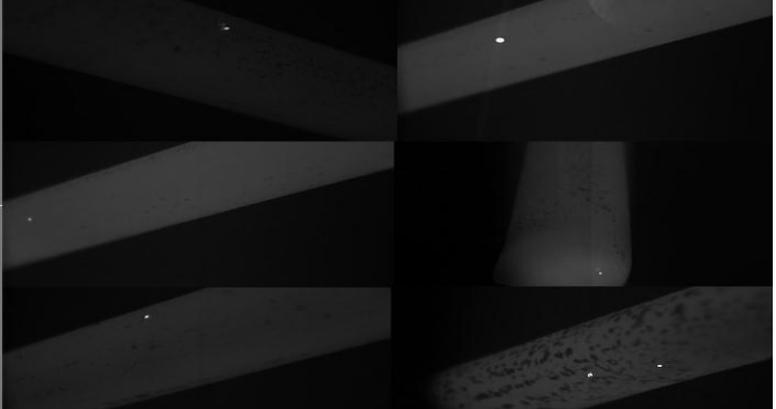
棒材规格(mm)	$\phi 40$			$H22$		
	样本数 (幅)	识别数 (幅)	识别率	样本数 (幅)	识别数 (幅)	识别率
裂纹	30	28	93.3%	30	29	96.7%
划伤	30	27	90%	30	28	93.3%
氧化铁皮	30	30	100%	无	无	无
刻字	30	30	100%	30	30	100%
合计	120	115	95.8%	90	87	96.7%

通过表 6-1 可以看出， $\phi 40$ 型号圆钢表面的氧化铁皮和刻字两种伪缺陷被 100% 被判为合格钢坯，不会造成误判，虽然裂纹和划伤会产生漏判，但是误判率都低于 10% 在可以接受的范围内，且对于总共的 120 幅 $\phi 40$ 型号圆钢图像，只有 5 幅图像漏检，识别率达到 95%；对于 $H22$ 型号的六角钢，由于用料材质耐磨性强，所以生产过程中几乎不会出现氧化皮，在选取的样本中，刻字伪缺陷 100% 判断为合格品，不会出现误判，对于裂纹和划伤会产生漏判，且漏判率低于 $\phi 40$ 型号，对于选取的 90 幅图像，只有 3 幅漏判，漏判率为 3.3%，在允许的范围内。通过对 $\phi 40$ 和 $H22$ 两种型号钢坯的测试，可以看出选取的总共 210 幅图像，没有出现误判情况，避免了生产线因为误判缺陷而影响正常运作，漏检 8 幅，识别率接近 96%，且这两种型号各自的识别率都在 95% 以上，以上实验数据表明在模拟环境下该检测系统能够达到要求，且能够保证系统的稳定性。

6.2 现场检测结果

贵钢生产的钢坯型号主要有： $\phi 12$ ， $\phi 14$ ， $\phi 26$ ， $\phi 29$ ， $\phi 30$ ， $\phi 32$ ， $H22$ 由于钢坯图像太多，采用不同型号钢坯生产线出现的部分裂纹图像，如表 6-2。由于检测系统是在线实时检测，这几次现场获取到的钢坯图像信息太多，根据最近一次在首钢贵钢钢坯生产现场获取到的图像及在线检测结果，选用 $\phi 26$ 型号钢坯检测结果进行分析，检测结果如表 6-3 所示。

表 6-2 检测系统识别出的钢坯裂纹图像

棒材规格 (<i>mm</i>)	裂纹参数 (<i>mm</i>)	监测系统识别出裂纹 (图片)
Φ12	裂纹宽度 0.2 (最小值) 裂纹长度 0.2 (最小值)	
Φ14	裂纹宽度 0.2 (最小值) 裂纹长度 0.2 (最小值)	
Φ26	裂纹宽度 0.2 (最小值) 裂纹长度 0.2 (最小值)	
Φ29	裂纹宽度 0.3 (最小值) 裂纹长度 0.3 (最小值)	

续表 6-2

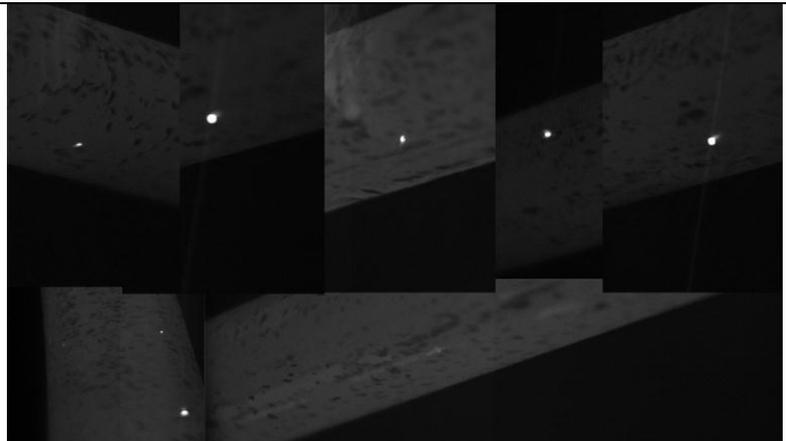
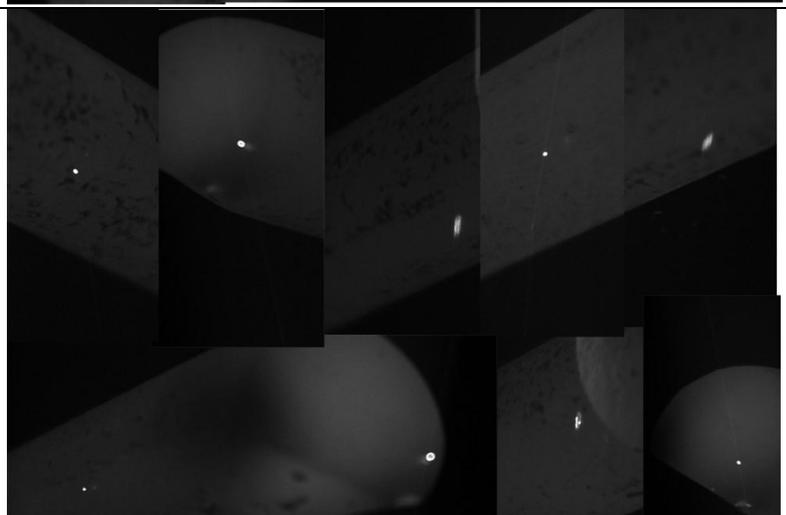
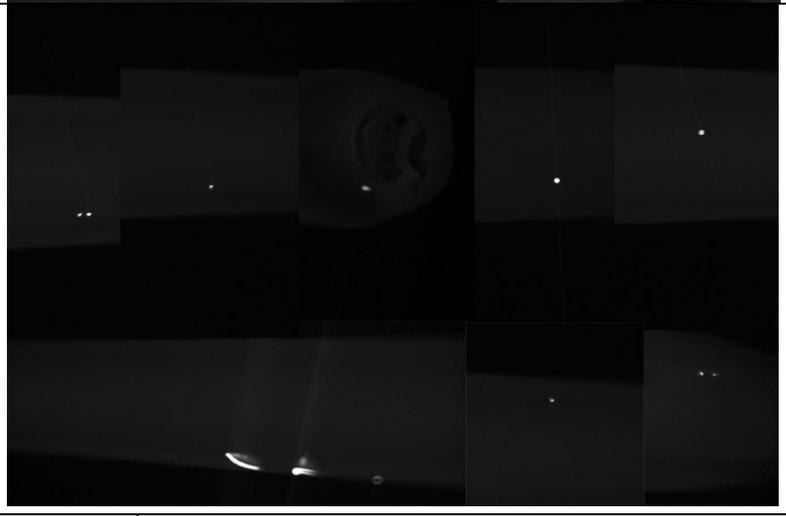
<p>Φ30</p>	<p>裂纹宽度 0.2 (最小值) 裂纹长度 0.2 (最小值)</p>		
<p>Φ32</p>	<p>裂纹宽度 0.2 (最小值) 裂纹长度 0.2 (最小值)</p>		
<p>H22</p>	<p>裂纹宽度 0.2 (最小值) 裂纹长度 0.2 (最小值)</p>		
<p>环境参数</p>	<p>速度 (m/s)</p>	<p>$\sim 10 m/s$</p>	
	<p>温度 ($^{\circ}C$)</p>	<p>$\sim 1000^{\circ}C$</p>	

表 6-2 中钢坯裂纹是图像亮区，大部分是星状，此外，表中给出了钢坯生产速度以及周围环境的温度。

表 6-3 $\phi 26$ 型号钢坯生产现场检测结果

种类	样本数 (幅)	识别数(幅)	漏判 (幅)	误判 (幅)	识别率
裂纹	145	136	9	0	93.8%
划伤	68	64	4	0	94.1%
氧化铁皮	446	446	0	0	100%
刻字	281	281	0	0	100%
合计	940	927	13	0	98.6%

通过表 6-3 可以看出, 对 $\phi 26$ 型号圆钢在线检测中, 带有氧化铁皮 (446 幅) 以及刻字 (281 幅) 两种伪缺陷钢坯 100% 判定为合格产品, 没有误判为缺陷, 保证了生产线的正常运行; 145 幅带有裂纹的图像有 9 幅漏判, 识别率 93.8%, 68 幅有划伤图像有 4 幅漏判, 识别率 94.1%, 两种缺陷虽然存在漏判, 但是检测率均在 93% 以上。总体选取的 940 幅图像中, 只有 13 幅漏判, 误判的存在, 识别率达到 98.6%。现场的测试数据表明该检测方法能够很好的完成钢坯在线检测的需求。

6.3 本章小结

本章通过对钢坯裂纹检测系统分别进行实验和生产现场的测试, 给出了部分缺陷图像, 并对检测系统的准确率进行了评估, 保证了该检测算法的准确性和系统的稳定性。

第七章 全文总结与展望

7.1 全文总结

钢坯铸造过程中出现裂纹等缺陷是较常见的现象，钢坯处于高速高温环境给检测带来了困难，传统的接触式检测方法已不在适用。另外，我国对钢铁的需求量的加大，且对钢坯质量的检查要求也更加严格，然而国内的检测技术还不成熟，国外检测设备的价格较高。本论文针对贵钢的实际情况，利用 MFC 开发工具及图像处理技术，结合硬件上的需求，构建了钢坯表面裂纹检测系统，能够将钢坯铸造过程出现的缺陷及时检测出来。本文取得的主要研究成果如下：

1、在检测高温钢坯裂纹过程中，能够准确地避免将氧化铁皮及刻字两种伪缺陷的干扰，成功的将裂纹及划伤识别出来，保证钢坯铸造过程的正常进行。

2、针对钢坯轧制过程中，高速使得铁屑从钢坯表面脱落，造成系统处于高粉尘环境中，且钢坯表面一直处于 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 的高温状态，若 CCD 像机长期工作在这样的环境下，肯定导致系统无法正常工作，对 CCD 像机进行降温以及防尘保护，保证 CCD 像机的正常工作及采集到图像的高质量。

3、采用多线程同步技术实现图像的高速采集，对采集的钢坯图像进行锁定区域处理，减少检测算法的复杂度，排除刻字干扰，满足检测的实时性与准确性。

4、针对钢坯缺陷在图像中显示特点，根据灰度特征及形状特征，提出灰度分层法。对算法中各个步骤进行多种方法对比，选出效果最好且简单方法，通过算法上的优化以及利用对左、右、上图像的多线程同步技术，能够满足钢坯 10m/s 的运行速度。

5、分别利用 Sobel 边缘检测及 Hough 直线检测，成功检测出裂纹、划伤缺陷的长度、宽度、周长及获取时间等数据信息，确保对检测结果的随时查看，为今后裂纹识别工作打下基础。

6、除对检测系统进行实验室环境下测试，在钢坯生产现场进行多次反复检测，针对每次现场检测遇到的问题进行算法改进和系统优化，保证了钢坯裂纹检测系统的准确性及稳定性。

7.2 展望

本课题已经完成高温钢坯表面裂纹在线检测系统的硬件构架及软件设计，且该检测系统基本能够完成钢坯铸造过程中钢坯缺陷的识别。然而，若后期将该系

统投入到钢坯生产线上，还需对以下方面进行更深入研究与改进：

1、对多种类缺陷进行研究，实际钢坯缺陷的种类很多，本文只对4种情况进行了判断与识别，因此要对夹杂、结疤等缺陷进一步研究。

2、对钢坯图像处理算法进行优化，虽然本论文提出的算法基本能满足生产需求，但是随着检测种类的增多，算法的复杂度会增大，所以对算法进行优化才能完成缺陷的在线检测，满足高速生产的实时性。

3、本论文进行钢坯图像裂纹识别时，只对周长进行了检测，对于面积和深度的检测还需做进一步研究。

4、对检测系统在硬件构架上改进，使检测系统避免钢坯铸造生产线的抖动影响，独立成一个模块。

致 谢

本论文是在导师张利勋和余学才教授的共同悉心指导下完成的。首先要感谢张老师和余老师，张老师严谨的治学作风、敏锐的洞察力、勇于创新的思维和平易近人的作风，在学习和生活上对我影响颇深。余老师渊博的知识、认真与执着的工作态度和实事求是的科研作风是我学习的榜样。三年的时间里，在科研上两位老师的悉心指导、严格要求和不断鼓励，使我独立思考和分析问题的能力得以充分发挥，在生活上对我的关怀和帮助，让我终身难忘。让我再次向两位老师表示诚挚的感谢。

感谢纪国超、王玉杰、李林林、卢磊和师兄万聪灵，在学习上和生活上给予帮助，特别是纪国超严谨的学习态度，在代码和问题分析过程中给予了很大的帮助，万聪灵师兄活跃的思维在研究方向上予以指引。

感谢三年的舍友们，她们在生活和学习上给了我很多帮助和鼓励。

感谢家人和男朋友的关怀与激励，让我有不断努力前进和不畏困难不断探索的动力，他们是我强大的后盾。

最后，感谢贵钢第三轧钢厂为本课题提供的实验平台和支持，使该课题能够顺利进行和完成。

参考文献

- [1] 王廷薄. 板带材生产原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995, 3-5
- [2] 吴平川, 路同浚, 王炎. 钢板表面缺陷的无损检测技术与展望[J]. 无损检测, 2000, 22-23
- [3] R. Ahmed, M. P. F. Sutcliffe. Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip[J]. Wear, 2000, 244(1-2): 60-70
- [4] J. C. Badger, S. T. Enright. Automated surface inspection system[J]. Iron and Steel Engineer, 1996, 73(3): 48-51
- [5] H. T. Zhang, F. J. Duan, K. Q. Ding. Study on On-Line Surface Defect Detection Vision System for Steel Strip[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2007, 20(8): 1899-1902
- [6] H. Y. Kim, H. C. Kwon, H. W. Lee, et al. Processing Map Approach for Surface Defect Prediction in the Hot Bar Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3): 70-80
- [7] M. S, 余永桂. 频闪法在带钢表面检查中的应用[J]. 世界钢铁, 1994, 4: 65-68
- [8] 徐祥征. 牵引电机主极裂纹涡流检测原理与设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(11): 82-83
- [9] 杨水山. 冷轧带钢表面缺陷机器视觉自动检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009, 3-4
- [10] Y. Okamoto, F. Kaminaga, O. Metal. Detection of surface flaw by infrared radiation sensor[J]. The 7th Sensor Symposium, 1988, 107-112
- [11] Y. Storm. Automatic surface inspection of continuously cast billets[J]. Iron and Steel Engineer, 1992, 69(5): 29-33
- [12] H. Maki, Y. Tsunozaki, Y. Matsufuji. Magnetic on-line defect inspection system for strip steel[J]. Iron and Steel Engineer, 1989, 66(9): 26-33
- [13] 宋瑞祥. 冷轧钢板的生产 and 最新检测系统[J]. 上海宝钢集团公司钢研所科技信息中心, 1995, 21-26
- [14] 李健敏. 激光声表面波及其与表面缺陷作用的有限元模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2006, 3-5
- [15] H. Raafat, S. Taboun. An integrated robotic and machine vision system for surface flaw detection and classification[J]. Computers and Engine, 1996, 30(1): 27-41
- [16] W. L. Norton, W. J. Hill, R. A. Brook. Automatic Visual Inspection of Moving Steel Surfaces[J]. British Journal of NDT, 1997, 09: 242-256

- [17] J. W. Morris. Method and Apparatus for Real Time Defect Inspection of Metal at Elevated Temperature[P]. United States, US5654977, 1997. 08. 05
- [18] H. B. Jia, Y. L. Murphey, J. Shi, et al. An Intelligent Real-time Vision System for Surface Defect Detection[J]. International Conference on Pattern Recognition, Icpr, 2004, 3: 239-242
- [19] S. H. Choi, H. M. Bae, H. W. Hwang, et al. Device and Method for Optically Detecting Surface Defect of Round Wire Rod[P]. United States, US20100246974A1, 2010. 09. 30
- [20] 张子恕. 影像式线棒材在线表面检测系统[J]. 轧钢, 2009, 26(3): 46-48
- [21] 黄志良. 基于数字图像处理的高温钢坯裂纹检测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013, 2-3
- [22] 王斌, 罗志勇, 刘栋玉, 等. 带钢边缘缺陷实时图像识别与宽度测量算法[J]. 无损检测, 1997, 19(7): 188-190
- [23] 李炜, 黄心汉, 王敏, 等. 基于机器视觉的带钢表面缺陷检测系统[J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(2): 72-74
- [24] 吴平川, 路同浚, 王炎. 带钢表面自动检测系统的研究状况与展望[J]. 钢铁, 2000, 35(6): 70-75
- [25] 吴平川, 路同浚, 王炎. 机器视觉与钢板表面缺陷的无损检测[J]. 钢铁, 2000, 22(1): 13-16
- [26] K. Xu, J. W. Xu, S. L. Lu. Research on Automati Surface Inspection System for Cold Rolled Strips[J]. Iron and Steel, 2000, 35(10): 63-66
- [27] G. F. Wu, J. W. Xu. Local Border Search Slgorithm and its Application[J]. Journal of Computer Applications, 2005, 25(2): 326-329
- [28] H. Sun, K. Xu, J. W. Xu. Online Application of Automatic Surface Quality Inspection System to Finishing Line of Cold Rolled Strips[J]. Journal of University of Science and Technology of Beijing, 2003, 10(4): 38-41
- [29] 徐科, 徐金梧. 基于图像处理的冷轧带钢表面缺陷在线检测技术[J]. 钢铁, 2002, 37(12): 61-64
- [30] L. A. O. Martins, F. L. C. Pádua, P. E. M. Almeida. Automatic detection of surface defects on rolled steel using Computer Vision and Artificial Neural Networks[J]. Iecon Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, 7500(1): 1081-1086
- [31] L. Hu, F. J. Duan, K. Q. Ding, et al. Research on Surface Defects on Line Detection System for Steel Plate Using Computer Vision[J]. Iron and Steel, 2005, 40(2): 59-61
- [32] L. Hu, F. J. Duan, K. Q. Ding, et al. The Application of FPGA-based Image Processing Technology in Surface Defect Detection System for Steel Strip[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(3): 694-696

- [33] 何永辉, 王康健, 石桂芬. 基于机器视觉的高速带钢孔洞检测系统[J]. 应用光学, 2007, 28(3): 345-349
- [34] 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
- [35] 王庆有, 孙学珠. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993, 10-70
- [36] 张大鹏. 模式识别与图像处理并行计算机系统设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998, 5-60
- [37] K. R. Castlema. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998, 45-58
- [38] 王晓丹, 吴崇明. 基于 Matlab 的系统分析与设计-图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000, 25-70
- [39] 杨淑莹. VC++图像处理程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005, 86
- [40] 柳树, 于忠党. 一种改进的开关中值滤波算法[J]. 微计算机应用, 2009, 30(12): 1-6
- [41] 王家文, 李仰军. Matlab7.0 图形图像处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005, 226-230
- [42] 张铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉-Visual C++与 Matlab 实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010, 151-156
- [43] M. S. Spurbeck, P. J. Schreier. Causal Wiener Filter Banks for Periodically Correlated Time Series[J]. Signal Processing, 2007, 87(6): 1179-1187
- [44] 吴贵芳, 徐科, 徐金梧. 边界局部搜索算法与应用[J]. 计算机应用, 2005, 25(2): 326-328
- [45] H. C. Zhang, G. F. Wu, X. M. Sun, et al. A New Fast Border Search Algorithm and Its Expansion[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China, 2007, 1886-1890
- [46] 李运祥, 丁卫霞, 苏兰海, 等. 热轧带钢在线测宽中的图像分割[J]. 北京科技大报, 2003, 25(4): 365-369
- [47] W. H. Cui, Z. Q. Guan, Z. Y. Zhang. An Improved Region Growing Algorithm for Image Segmentation[C]. International Conference on Computer Science and Software Engineering, 2008, 93-96
- [48] 周敬. 图像分割中阈值法的研究[J]. 机电技术, 2010, 33(1): 39-41
- [49] N. Otsu. A Threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Traps, 1979, 9: 62-66
- [50] 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
- [51] 万聪灵. 高温钢坯机器视觉在线检测系统关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014, 31-32

- [52] R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing, third edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011, 20-500
- [53] 左飞, 万晋森, 刘航. 数字图像处理原理与实践: 基于 Visual C++开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011, 365
- [54] 陆宗骥, 梁诚. 用 Sobel 算子细化边缘[J]. 中国图象图形学报, 第5卷(A版)第6期, 2000. 6
- [55] N. R. Pal, S. K. Pal. A Review on Image Segmentation Techniques[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(9): 1277-1294
- [56] B. Bhanu, J. Peng. Adaptive Integrated Image Segmentation and Object Recognition[J]. IEEE Trans, Man, Cybernetics, 2000, 30(4): 427-441
- [57] X. Zhang, M. D. Desai. Segmentation of bright targets using wavelets and adaptive thresholding[J]. Image Processing IEEE Transactions on, 2001, 10(7): 1020-1030
- [58] H. K. Yuen, J. Illingworth, J. Kittler. Ellipse Detection using the Hough Transform[C]. Proceedings of the Forth Alvey Vision Conference, 1988, 60-64
- [59] 求是科技. Visual C++数字图像处理典型算法及实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006, 234-247

攻读硕士学位期间取得的成果

- [1] 余学才, 付邦瑞, 万聪灵, 吴树林. 一种机器视觉棒材高温钢坯表面裂纹检测算法[P]. 中国, 发明专利, 201410486074, 2014. 09. 22
- [2] 余学才, 吴树林, 纪国超, 付邦瑞. 一种在强光下获取目标图像的方法及装置[P]. 中国, 发明专利, 201410484263, 2014. 09. 22