

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 高温钢坯机器视觉在线检测系统软件设计

学科专业 光 学 工 程

学 号 201221050230

作者姓名 纪国超

指导教师 张利勋 副研究员

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软件设计

(题名和副题名)

纪国超

(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。

THE SOFTWARE SYSTEM DESIGN 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: Ji Guochao

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

机器视觉技术，是一种无损检测技术，其在工业、农业、军工、航空航天等领域得到了广泛应用，尤其在那些不适合人工作业的高温，高压，有毒等恶劣环境下，常用机器视觉测量技术来替代人工测量。高效精确的检测能够提高其钢铁等产品的成品率，进而提高生产率，促进生产成本的降低，最终使竞争力得到增强。在钢坯轧制过程中，对其质量的有效控制是最为关键的一步。鉴于此，开发了“高温钢坯机器视觉在线检测系统”，此项目是联合首钢贵钢向贵阳市科技局提出申请并获得资金支持。

本文提出的三目传感器标定技术，解决了前期双目传感器视场不足的问题；经过创新该系统克服了目前类似系统功能单一的缺点，既能够对高温钢坯的轮廓进行测量也能对其表面裂纹进行检测。本文重点在理论和算法分析的基础上完成了软件系统的设计与实现。

主要工作如下：

- 1、对本系统中所用到的技术理论进行了研究、对软件开发环境及本检测系统进行了介绍。
- 2、对软件系统进行需求分析。在配套硬件结合下，分析了系统的总体目标、用户和性能需求，重点对系统的功能需求进行分析，为系统的设计做准备。
- 3、对软件系统进行设计。结合实际情况提出基本设计原则、系统框架设计和系统的整体设计。基于功能需求分析对功能模块进行详细设计，另外针对数据库的使用进行设计，为系统的实现做准备。
- 4、对软件系统进行实现。在 Visual C++6.0 开发环境下，利用 MFC 技术，对每个类进行功能分配，在算法分析的基础上，通过类与类之间的消息传递实现了系统各个模块的功能和界面开发。
- 5、对软件系统进行测试。分别在实验室环境和生产现场运行软件系统，验证了系统的稳定性和可靠性。

该系统的算法准确、稳定，通过贵钢生产线的多次测试得到证明；系统的操作界面设计简单、人性化，易于工作人员使用。该系统的软件设计在性能和操作方面都能够满足要求。尽管已通过相关部门的验收，但系统仍然需要优化，进而提升系统的实用性。

关键词：高温钢坯，机器视觉，三目传感器，标定，软件系统设计

ABSTRACT

Machine vision technology is a kind of nondestructive testing technology, it has been widely applied in industry, agriculture, military, aerospace and other fields, especially in those who are not suitable for manual operation of high temperature, high pressure, toxic and other harsh environments, machine vision measurement technology is used commonly to replace the manual measurement. Efficient and accurate detection can improve the yield of steel products, and then improve productivity and reduce the production cost, eventually enhance the competitiveness. In the process of billet rolling, effective control of the quality is the most crucial step. Under this background, we joint Guigang put forward the “Hot Billet Machine Vision On-line Detection System” to Guiyang Science and Technology Bureau. This project got their funding support.

This thesis proposes the three-sensor calibration technique, it solves the problem that the field of two-sensor is insufficient; compared with other similar systems, the system designed in this thesis overcomes the drawback of having one function, it can not only measure the outline of the hot billet, but also can detect the surface crack. On the basis of the theory and algorithm analysis, we complete the design and realization of the software system.

The main works are as follows:

1. Study the theories that used in this system, introduce the software development environment and the detection system.
2. Make demanding analysis of software system. In combination with hardware, we analyze the overall goal of the system and requirements of users and performance, the emphasis on analysis of the system's functional requirements makes preparations for the design of system.
3. Make design of software system. Combine with actual conditions, we put forward the basic design principle, system framework design and the integral design of the system. Based on the analysis of function requirement, we make the design of function module in details, in addition, the design for the use of the database is prepared for the realization of the system.
4. Realize the software system. We use MFC technology in the environment of Visual C ++ 6.0 and make functional allocation for each class. On the basis of algorithm

analysis, we realize various modules function and interface development through the messaging between class and class.

5. Test software system. Through running software system both in the laboratory environment and production field, we verified the stability and reliability of the system.

The algorithms used in this system are accurate and stable, they have been verified in billet production line of Guigang; the interface design is simple and human, it is easy for stuff to operate. The design of the software system is able to meet requirements both in function and operation. Although the system has passed the acceptance of the relevant departments, it still needs to be optimized to raise the practicality.

Keywords: Hot billet, Machine vision, Three-Sensor, Calibration, Software design

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题的研究背景和意义	1
1.2 国内外研究及应用现状	2
1.3 论文研究内容和结构安排	4
第二章 技术基础及系统介绍	6
2.1 线结构光机器视觉轮廓测量技术	6
2.2 多图像传感器标定技术	11
2.2.1 摄像机成像模型	11
2.2.2 线结构光三目传感器标定技术	17
2.3 软件开发环境介绍	29
2.4 高温钢坯在线检测系统介绍	29
2.5 本章小结	30
第三章 软件系统分析	31
3.1 系统的配套硬件	31
3.2 系统的总体目标	32
3.3 系统用户分析	32
3.4 系统功能需求分析	33
3.4.1 钢坯轮廓测量	33
3.4.2 表面裂纹检测	33
3.4.3 数据的存储	33
3.4.4 轮廓参数的波形显示	33
3.4.5 异常情况的处理	33
3.5 系统性能需求分析	34
3.6 本章小结	34
第四章 软件系统设计	35
4.1 设计原则	35
4.2 系统框架设计	35
4.3 系统整体设计	37
4.3.1 整体功能设计	37
4.3.2 系统流程设计	37

4.4 系统功能模块详细设计	38
4.4.1 系统初试化模块	38
4.4.2 参数信息输入模块	38
4.4.3 获取钢坯图像	38
4.4.4 钢坯轮廓测量	38
4.4.5 表面裂纹检测	39
4.4.6 数据的存储与查看	39
4.4.7 轮廓参数的波形显示	39
4.4.8 异常情况的处理	39
4.5 数据库的设计	40
4.6 本章小结	41
第五章 软件系统实现	42
5.1 欢迎界面及主界面的实现	42
5.2 系统初试化模块的实现	45
5.3 参数信息输入模块的实现	46
5.4 获取钢坯图像的实现	46
5.5 钢坯轮廓测量的实现	49
5.5.1 单像素轮廓图像的获取	50
5.5.2 轮廓参数的求解	57
5.5.3 轮廓图像与参数的实时显示	66
5.6 表面裂纹检测的实现	67
5.7 数据的存储与查看	69
5.8 轮廓参数的波形显示	72
5.9 异常情况的处理	73
5.9.1 摄像机温度过高	73
5.9.2 声报警	74
5.10 本章小结	74
第六章 系统测试与运行	75
6.1 系统测试	75
6.2 系统运行	75
6.2.1 实验室环境下运行	76
6.2.2 贵钢现场环境下运行	78
6.3 本章小结	81

第七章 总结与展望	82
7.1 工作总结	82
7.2 工作展望	83
致 谢	84
参考文献	85
攻读硕士学位期间取得的成果	89

第一章 绪 论

1.1 课题的研究背景和意义

钢铁产业是我国的经济建设的重要保证，同时钢铁也与我们生产生活息息相关，在汽车船舶、军事武器、楼房建设等领域使用广泛。我国现在处于经济高速发展期，对钢铁，特别是高质量的钢铁产品的需求越来越高。在生产工艺不断提高的同时，如何对钢坯轧钢生产过程进行高效快速的监控也显得尤为重要。

钢坯从轧钢生产到产品，高效快速的监测是保证成品率的重要因素。轧钢生产是高速度、高温度和高抖动的情况下进行，由于其特殊性实时在线检测系统的开发有一定程度的难度。目前适用于高温、高热的在线检测手段大部分是基于电磁、超声等方面的传感技术。一般用于钢渣、钢水下渣等的监测，但无法应用于对精度要求很高的钢坯轮廓尺寸和表面裂纹缺陷检测中来，只能用于高温物体的粗略监测。

测量方法一般分为两类：接触式测量和非接触式测量。游标卡尺、千分尺等测量工具代表了效率低的接触式测量，人为误差造成稳定性不高，而且接触工件表面进行测量，会对工件造成损伤，且无法满足高温高压等恶劣环境下的使用，故非接触式测量技术得到重视。经过长期发展，非接触测量技术主要有结构光法、激光测距法、X 射线扫描法、干涉测量法、超声波测距法等测量技术^[1]。

上世纪七十年代，CCD 和 CMOS 传感器技术出现，其具有非接触式、响应速度快以及环境承受力强等优势^[2-3]，能够很好地应用到轧钢生产过程中。随着 CMOS 生产工艺的不断发展和完善，在像素大小和成像速度等成像质量上都优于 CCD，进而促使了机器视觉技术的革新，基于机器视觉技术的非接触式测量方法在工件测量中得到了广泛应用^[4]。

在上世纪六十年代，欧美等国家就已经对基于机器视觉的测量技术进行了相关研究，并且提出了相关理论，但这些理论只停留在实验室阶段，并未广泛投入使用。上世纪七十年代，人们开始对基于线结构光的机器视觉测量技术进行研究^[5]，由于激光本身具备方向性好、高亮度等特点，越来越多地选用线激光器作为线结构光的光源。特别是 Tsai^[6]，Zhang Z^[7]等学者对摄像机成像原理以及摄像机标定技术的研究，促使基于三角测量方法的机器视觉技术得到了发展，伴随着感光元器件性能不断提升，使得机器视觉技术在工业检测、工业探伤、精密测控等领域取得了长足的发展^[8]。

计算机 CPU 的处理能力不断提升特别是多核 CPU 的出现，使计算机并行计算

能力得到了长足发展，利用多线程处理技术可以使程序得以将其工作分开，独立运作，互相不影响^[9]，极大地提高了处理数据的能力。本课题对基于线结构光的机器视觉在线检测技术进行了研究，基于 VC++ 6.0，利用多线程技术，开发出了“高温钢坯机器视觉在线检测系统”，极大地提升了处理能力和测量精度，并通过与贵钢的合作，进行了多次现场在线检测，不断对算法和软件系统进行优化，取得了很好的测量结果，并通过创新，不仅能测量钢坯轮廓还可以对钢坯表面裂纹进行高效的检测。

1.2 国内外研究及应用现状

机器视觉在线检测系统通过将系统设备安装到相关生产线上，通过工业像机获取被测物体图像后通过图像采集卡采集图像并传输到计算机中，然后通过软件系统实时检测生产线上的产品，对生产情况进行实时的反馈，进而指导生产，及时发现问题，提高产品的合格率。

基于机器视觉的钢坯轮廓测量系统已经成功投入市场，进行钢坯表面裂纹检测也有相对成熟的系统，但功能都相对单一，无法将轮廓测量与裂纹检测两种主要功能进行整合。

欧美的钢铁企业早在上世纪 80 年代左右就已经从事机器视觉在线检测系统的技术研究，不断开发了多种基于机器视觉技术的在线检测设备。目前在从事机器视觉工业检测的公司中最具代表性的是美国的 OG Technologies 公司和德国的 Siemens VAI Metals Technologies 公司，这两家公司成产的设备在国内扎钢生产检测市场有高达 80%以上的占有率。



图 1-1 热眼检测设备

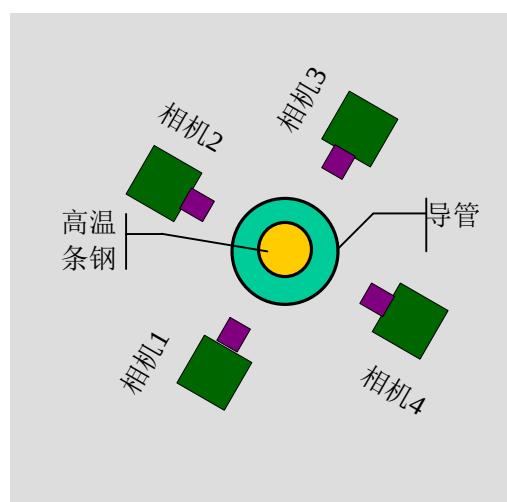


图 1-2 摄像机分布示意图

OG Technologies 公司最为著名的设备是热眼（HotEye）检测系统，专门用于钢坯裂纹在线检测，如图 1-1 所示。该系统通过使用三个或四个摄像机实现全视角的获取钢坯图像用于检测，系统装置如图 1-2 所示。

热眼系统检测原理如图 1-3 所示，其采用主动式检测。检测过程，首先通过照明光源利用他们专有的光学设计向钢坯投射高强度可见光，钢坯表面的反射光强度受到局部表面斜率的影响，根据反射光的强度反映了图像的明暗度，同时利用如图 1-2 所示的摄像机进行超快速摄像，用于捕获钢坯图像。在钢坯表面平顺度被破坏处（存在缺陷处），因斜率变化导致反射光强度变化，进而导致捕获的图像存在灰度差，基于图像具有的灰度差特征进行图像处理来判断缺陷。

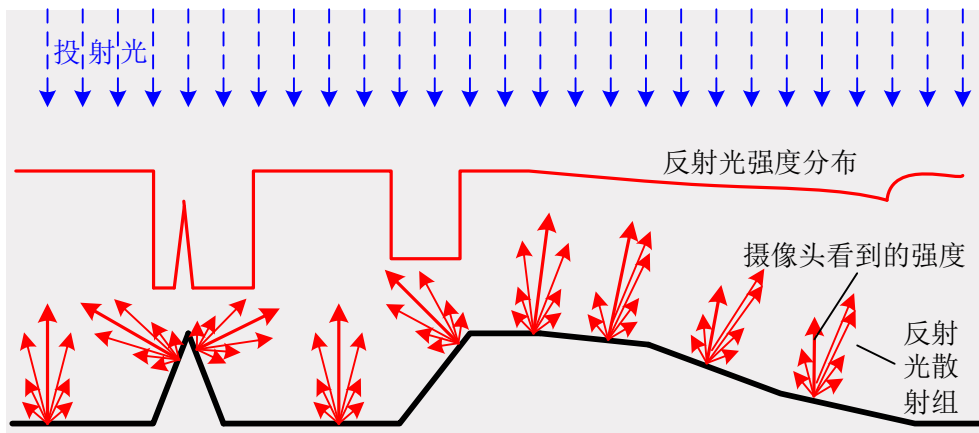


图 1-3 热眼系统检测原理示意图

该测量系统能够检测出钢坯表面上各个方向上绝大多数种类的裂纹，且实现了最小可达 0.020mm 的高分辨率。但其由于结构上采用垂直直视的模型，只能够进行钢坯表面缺陷的检测，无法实现钢坯轮廓的测量，功能较单一且价格昂贵。



图 1-4 SIROLL Orbis 测径仪

德国 Siemens VAI Metals Technologies 公司主要开发钢坯等棒材的轮廓检测设备，SIROLL Orbis 设备是其生产的一种测径仪系统，如图 1-4 所示。该系统用于对圆钢的轮廓进行测量，测量速度可达 100 m/s ，可以满足绝大数的棒材生产要求。

SIROLL Orbis 的测量系统采用的原理如图 1-5 所示。LED 灯作为系统的光源，投射过程中经过组合透镜产生平行光并投射到高温钢坯表面，CCD 摄像机进行图像获取，然后通过网线将图像的数据信息输送至计算机，通过软件系统再进行轮廓测量。如图 1-6 所示，在测径仪测量过程中，光学系统相对钢坯不停地快速旋转，每旋转 360° 便获取一次钢坯的轮廓信息。

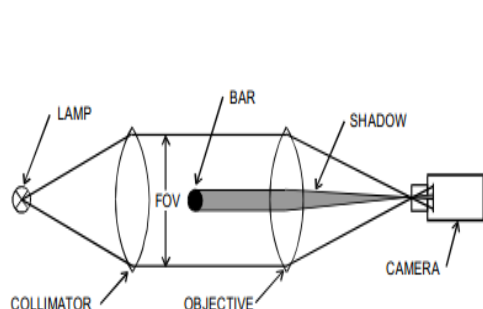


图 1-5 SIROLL Orbis 系统原理图

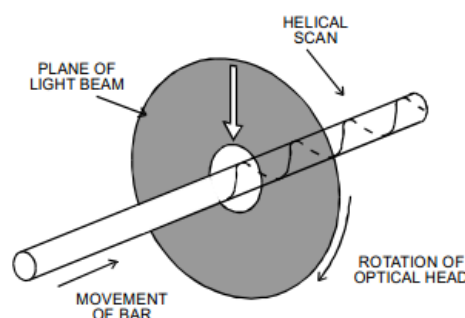


图 1-6 SIROLL Orbis 系统轮廓扫描示意图

该测量系统虽然得到广泛应用，但无法对六角钢这类异形钢坯进行完整地成像。另外整个测量系统要求系统内部要保持非常洁净，以满足光学系统的高速旋转，对轧钢生产这种高温、高粉尘和高湿度的环境来说不太理想，所以在持续运行一段时间后可能会有无法旋转的问题。

国内在机器视觉在线轮廓检测技术方面的研究，在上世纪八十年代末期才有类似研究，取得了一定的成果，但只停留在高校和科研院所里，并未有实际设备诞生。1989 年，宝钢与中科院上海技术物理所合作，实验研发出了 GCJ-III 光电测径仪，可以对圆钢进行 100% 的在线检测^[10]，但该系统功能单一、运行缓慢。

1.3 论文研究内容和结构安排

本文借鉴国内外研究现状，通过对机器视觉在高温钢坯测量中关键技术的研究，重点进行软件系统设计，研发了一套“高温钢坯机器视觉在线检测系统”，该软件系统配合硬件系统，能够同时完成对高温钢坯的轮廓测量和表面裂纹检测。在 Windows XP 系统下基于 Visual C++ 6.0 平台上完成了系统软件系统的设计和开发，在进行友好系统界面设计的前提下，利用多线程并行技术，实现了高速的轮廓测量和裂纹检测；并利用数据库技术，完整地保存钢坯的轮廓参数信息以及裂

纹信息，方便日后调取查看。根据上述研究内容，本文结构的安排如下：

第一章：绪论。介绍本课题的研究背景和意义，并结合本课题的高温钢坯机器视觉在线检测系统对国内外的研究及应用状况进行了阐述。

第二章：技术基础及系统介绍。本章首先介绍本检测系统中所用技术，包括线结构光的机器视觉轮廓测量技术、三目传感器标定技术等；另外对软件开发环境以及系统本身进行了介绍。

第三章：软件系统分析。本章首先介绍软件系统的配套硬件，再对软件系统的总体目标进行阐述，在此基础上对软件系统的功能需求和性能需求进行分析。

第四章：软件系统设计。本章对软件系统的设计做出了讲述。首先提出设计原则，介绍本系统的框架设计系统，从系统整体设计出发介绍整体功能设计和软件系统流程图。然后对系统各功能模块进行详细的功能设计，最后对所用到的数据库部分进行设计。

第五章：软件系统实现。本章将根据第四章的软件系统设计，实现对欢迎界面及主界面的设计，进而围绕软件系统的两大功能，钢坯轮廓测量和表面裂纹检测进行展开，对软件系统各个模块的进行实现，同时通过分析功能流程图对主要功能相关代码的实现进行说明。

第六章：软件系统测试与运行。本章首先介绍软件开发过程中进行的系统测试，以提高系统的可靠性；然后进行系统运行实验，分别在实验室环境和贵钢现场环境下对钢坯轮廓进行测量，并利用图形方式对系统测量结果与实际钢坯尺寸进行直观地对比，验证测量系统的准确性。同时对系统的测量误差进行分析并提出改进办法。

第七章：总结与展望。对本课题已完成的工作进行总结，对需要改进和完善的部分进行展望。

第二章 技术基础及系统介绍

在第一章中已经介绍过，德国的 Siemens VAI Metals Technologies 公司的 SIROLL Orbis 系统能对钢坯轮廓尺度测量，美国的 OG Technologies 公司的 HotEye 系统能对钢坯表面缺陷进行判断，但两个系统的技术方案只在某一测量范畴内有效。例如 SIROLL Orbis 系统，只对圆钢进行轮廓测量，无法对六角钢等异形钢坯进行轮廓测量；再如 HotEye 系统，在裂纹方面可无漏点地进行检测，但却无法测量钢坯的轮廓信息。现有的两种检测设备，都具有很高的价格，对钢铁企业来说，会大大增加其生产成本。

鉴于以上测量系统上的功能设计缺陷和结构设计经验，本文提出了三目摄像机对称测量结构，利用基于线结构光的机器视觉技术作为钢坯轮廓测量原理，同时利用被动光视觉检测作为检测裂纹的原理。测量系统的整体设计方案如图 2-1 所示，分为硬件系统和软件系统，硬件系统负责对高温钢坯图像进行实时地获取，软件系统主要负责高温钢坯轮廓测量和表面裂纹检测的实现。

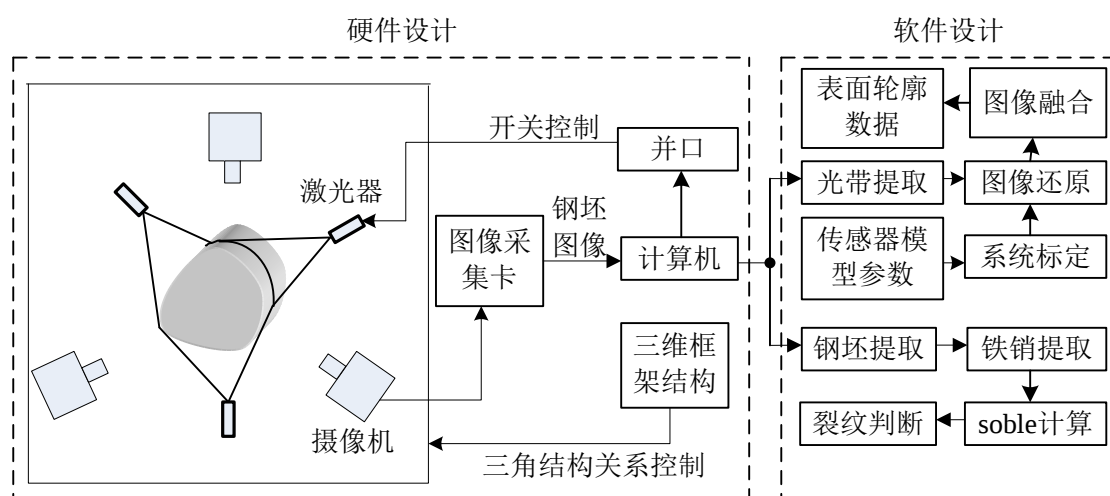


图 2-1 测量系统的整体设计方案图

2.1 线结构光机器视觉轮廓测量技术

机器视觉(Machine Vision)，又称计算机视觉(Computer Vision)。所谓机器视觉就是模拟人的视觉能力，利用摄像机等进行图像采集，再利用计算机进行数字图像处理，实现人类的视觉系统所能完成的功能。机器视觉技术的目的是对测量目标的形状、位置、姿态等信息进行感知^[8]。它将数字图像处理与特征分析、图像识别结合起来的一门先进图像处理技术。

机器视觉在重要领域的典型应用^[11]如表 2-1 所示:

表 2-1 机器视觉的典型应用

应用领域	应用实例
安全领域	基于人脸识别的门禁系统
工业控制	工件的无损检测
医疗保健	核磁共振, 病灶自动检测
生活娱乐	汽车自动驾驶, 人体感应游戏

机器视觉测量系统的基本构成如图 2-2 所示, 由照明光源、摄像机、图像采集卡、高性能计算机、软件系统、显示器等外设构成。其基本工作流程为照明光源照射到被测物体上, 形成较亮区域, 摄像头对准被测物体捕获其图像信息, 然后经过图像采集卡送至计算机, 然后根据不同测量目的编写不同的算法, 通过软件系统对图像数据进行处理最终得到结果并利用显示器进行显示。

机器视觉测量系统的核心是被测物体的图像采集和处理。然而进行图像处理所依据的信息全部来自采集的图像, 所以图像采集的质量, 是整个机器视觉测量系统的关键。图像的获取就涉及到照明光源的选取, 实际上系统测量过程中照明光源的选取是决定机器视觉测量系统图像质量的重要因素, 其影响可以达到 30% 以上^[12]。机器视觉测量系统中, 照明光源的作用主要用于照亮被测物体, 提高被测物体的亮度、达到最佳的成像效果, 还需要克服环境光干扰, 保证图像的稳定性^[12]。所以照明光源选择的标准, 一般要求亮度大、均匀性好及稳定性高, 以防止外界杂光环境对采集被测物体的图像产生严重干扰, 进而导致机器视觉测量系统的错误判断^[13]。

照明光源一般根据不同使用场景可选用卤钨灯、发光二极管、和激光光源等。本论文主要研究轮廓测量技术, 鉴于激光具有方向性强、单色性好、亮度高的特点, 所以选择激光器作为测量系统照明光源。由于“高温钢坯机器视觉在线检测系统”用于轧钢生产线中对热钢坯进行轮廓检测, 所检测的钢坯因高温本身就有一定的亮度, 所以在系统中选用激光光源作为照明光源, 再者, 由于是对钢坯轮廓进行检测, 无需获取其他图像信息, 所以选择了线激光器。这样就构成了线结构光的机器视觉轮廓测量, 它是在工业无损测量中应用非常广泛的一门技术。

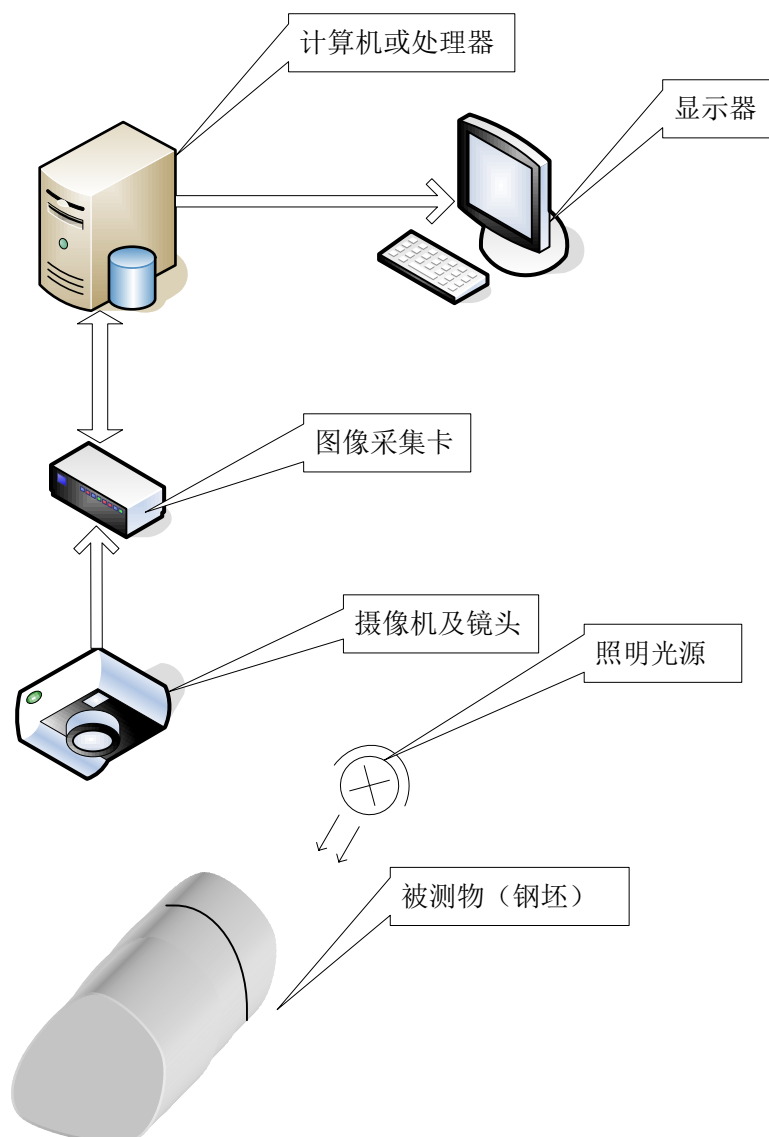


图 2-2 机器视觉测量系统的基本构成

结构光视觉方法，作为一种主动式光学测量技术，是为了解决立体视觉中图像匹配的难题而提出来的^[14]。其基本原理是，通过结构光光源将带模式的结构光照射到被测物体表面，形成被测物体表面的光学三维图像，由摄像机捕获该图像，通过特定算法分析获取图像信息，最终得到被测物体表面的三维信息。结构光机器视觉测量系统一般由结构光光源、摄像机及计算机系统三部分构成^[15-17]。根据照射光源采用的结构光的不同，测量方法可划分为：点结构光法、线结构光法、多线结构光法和网格结构光法等^[18]。本节主要研究线结构光机器视觉测量的原理及测量系统数学模型的建立。

线结构光机器视觉测量法，又称之为光切法，属于三角测量方法的范畴。其基本原理如图 2-3 所示，根据被测物体、线结构光光源和摄像机之间的三角空间位

置关系用以对被测物体进行表面轮廓信息图像的获取。该测量方法具有非接触、精度高，抗电磁干扰、速度快等优点。由于采用线结构光当做照明光源，在垂直照射到被测物时，会在其表面形成高亮的断面轮廓光带，摄像机会从另外一个角度对被测物的光带图像进行捕获，再通过软件系统利用相关算法对图像进行处理最终得到相应的轮廓信息^[19]。

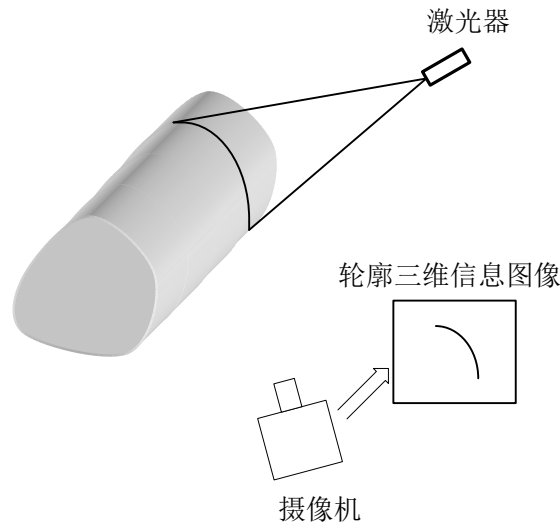


图 2-3 线结构光机器视觉测量系统结构示意图

线结构光机器视觉测量方法主要利用线结构激光器和摄像机进行图像传感测量，其测量过程主要分为两个步骤^[20]：

第一步：求得摄像机坐标系和世界坐标系之间的映射关系。利用三角形测量原理，在被测物体上标注特征点，利用摄像机捕获被测物体的表面信息图像，确定特征点在图像上的位置，即其在摄像机坐标系的位置，结合特征点在世界坐标系中的位置关系，求出两个坐标的映射关系式；

第二步：系统测量时，将线结构激光器打开照射到被测物体的表面，进而形成轮廓特征线，通过摄像机捕获图像，利用上一步所求坐标的映射关系，通过带有光带的图像坐标就可推出相对应的位于世界坐标系中的图像，进而得到物体轮廓的详细信息。

线结构光视觉测量技术的光路基本原理如图 2-4 所示。其中 β 为 CCD 的阵列与像机的光轴所形成的夹角， O 是像机的光轴(PO)与投影的光轴(QO)的相交点， γ 为 PO 与 QO 的夹角。假设 H 为被测物体上的某一点， I 为成像透镜系统， N 为点 H 在 CCD 上成像像素点，那么点 N 相对于 CCD 阵列的中心像素点 M 的偏移量为 $\Delta = |M - N|$ 。

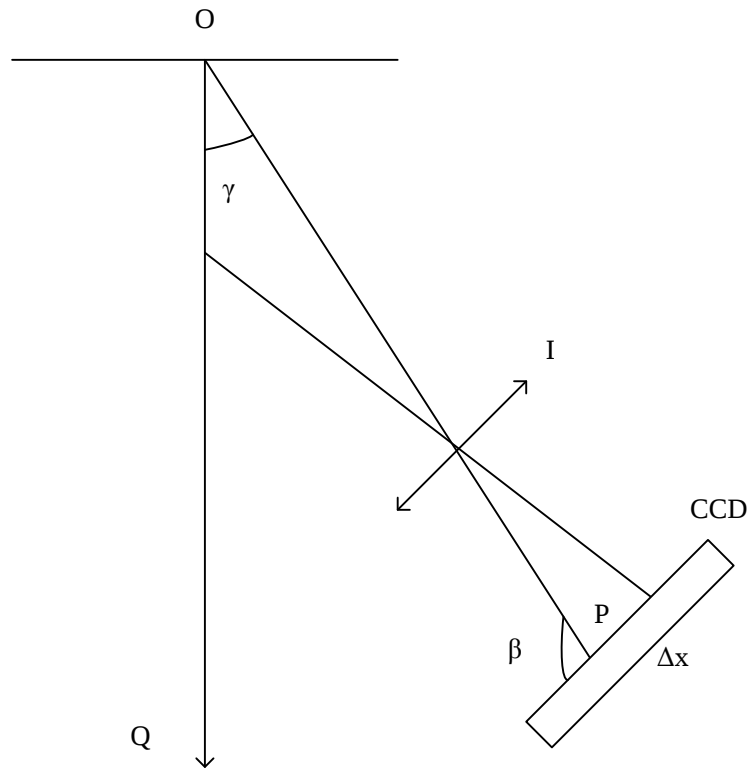


图 2-4 线结构光视觉测量法光路原理图

在系统测量时，为了使线结构光带上的物点都可以在 CCD 阵列上成像而不产生离焦，夹角 γ 和 β 须满足 *Scheimpflug* 条件：

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

其中 θ 为横向放大率。

由光路原理进一步推导，可以得到面行高度 OH 几何关系表达式如下：

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

根据公式 (2-2) 知， OH 与 Δ 成非线性关系(式中 f 为摄像机的等效焦距)。

系统进行测量时，当线激光器发出的激光带投射到被测物体上时，会在被测物体表面形成断面轮廓亮带，摄像机此时获取的图像就包括被测物体的断面轮廓信息。实际上，在初次进行系统测量之前，必须进行摄像机标定（关于摄像机标定技术，将在下一节中进行研究），也就是通过图像坐标系中断面轮廓图像的点 (u, v) 还原重构其对应世界坐标系中的三维物点 (x, y, z) 的过程。怎样才能实现重构，即怎样获得如下映射关系式：

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

2.2 多图像传感器标定技术

线结构光测量系统是基于三角测量原理实现的，当通过摄像机获取被测物体的图像时，由于被测物所在平面与摄像机所在平面非平行，即光轴与被测物体的轴有一个夹角，导致摄像机所获取的图像与实际被测物体的真实图像相比较是畸变图像。这就决定了摄像机标定是线结构光测量系统必须进行的步骤。然而，线结构光多目摄像机测量系统相较于线结构光单目摄像机测量系统来说，在对钢坯轮廓进行机器视觉测量时，需要两个或两个以上的摄像机，所以对每个摄像机进行必要的参数标定外，对系统的标定误差进行校正也是关键的一步。

2.2.1 摄像机成像模型

在机器视觉测量系统中，图像坐标系中某一物点与摄像机坐标系对应像素点的位置关系，是由系统中摄像机的成像模型唯一确定。成像模型的建立实现了从二维图像获取被测物体的空间三维信息的能力。由于不同的测量需要出现了不同的成像模型。一般分为线性和非线性两种模型^[21]。但是如果测量精度要求高，例如在大型工件的测量系统中，一般的摄像机镜头会采用广角镜头，此时该模型便不能精确地描述摄像机的成像几何关系^[14]，就需要建立一种非线性模型。

2.2.1.1 常用坐标系

机器视觉测量系统中，从被测物体的三维空间到摄像机成像，涉及到坐标系的变换。为了更好的研究摄像机标定技术，首先需要介绍三种常用的坐标系，其中包括图像坐标系、世界坐标系和摄像机坐标系^[22]。图 2-5 为三种坐标系空间位置关系示意图， P 为被测物体表面轮廓上某一物点，位于世界坐标系，坐标标记为 (x_w, y_w, z_w) ； N 为 P 点通过摄像机捕获的图像上的对应点，位于摄像机坐标系，坐标标记为 (x_c, y_c, z_c) 。

世界坐标系，摄像机在测量过程中的位置不定，可以根据情况人为选取一个基准坐标系作为世界坐标系。用于描述摄像机的所在位置和被测物体的空间位置。其选择的基本原则就是为了计算方便。在图 2-5 中，选择的世界坐标系是由原点 O_w 和 X_w, Y_w, Z_w 三坐标轴组成的三维坐标系。

摄像机坐标系，摄像机光心为其坐标原点， X ， Y 轴垂直于光轴， Z 轴平行于光轴。在图 2-5 中，选择的摄像机坐标系是由原点 O_c 和 X_c, Y_c, Z_c 三坐标轴组成的三维坐标系， O_c 为摄像机的光心， $O_c X_c Y_c$ 平面与摄像机的成像平面平行， Z_c 轴与 $O_c X_c Y_c$ 平面垂直，且与图像平面相交于一点，其在图像坐标系中的坐标标记为 (u_o, v_o) ，一般为图像的中心点坐标。

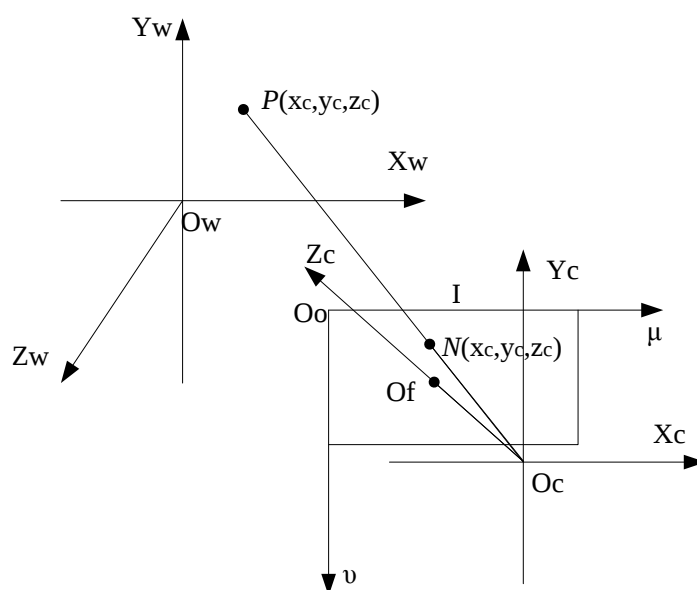


图 2-5 三种坐标系空间位置关系示意图

由图 2-5 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:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (2-4)$$

其中 R 为 3×3 的正交旋转矩阵, T 为 3×1 的平移矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中矩阵 R 中的元素参数 $r_1 \sim r_9$ 为实数。

将公式 (2-4) 用齐次坐标改写, 如下:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

图像坐标系，定义于图像所在平面上的二维直角坐标系。可选用以像素或物理长度为基本单位，其特点是一般选择图像的左上角作为坐标原点。如图 2-5 所示，选择左上角的点 O_p 为原点， μ, ν 分别为坐标轴组成的二维坐标系。下面用以 (u, v)

和 (x, y) 来分别表示像素和物理长度，如图 2-6 所示。摄像机的 CCD 单位像素在 x 轴和 y 轴上对应的物理尺寸分别为 d_x 和 d_y ，此参数已知由生产厂商提供，其中比值 d_y/d_x 称为纵横比，那么由图 2-6 可知，像素坐标 (u, v) 与图像坐标 (x, y) 的关系表示为 $\mu = x/dx + \mu_0$ ， $v = y/dy + v_0$ ，用矩阵表示如下：

$$\begin{bmatrix} \mu \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & \mu_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中， λ 表示描述 CCD 坐标轴的斜率因子。

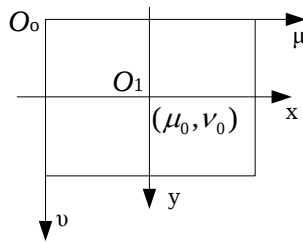


图 2-6 图像坐标系

2.2.1.2 摄像机线性模型

线性摄像机模型，也称为针孔模型，由小孔成像原理推导而来^[22-23]。它是在简单的透视投影基础上，再加上刚体的旋转和平移而得到，尽管它没将摄像机镜头的畸变考虑在内，但却能很好的描述实际摄像机，是其他非线性模型和摄像机标定的基础，其原理如图 2-7 所示。

图 2-7 中， $O_c - X_c Y_c Z_c$ 表示摄像机坐标系， $O_o - uv$ 表示图像坐标系；假设 P 为空间中某点， q 为图像坐标系中的对应点，以物理长度为单位，用 (x, y) 表示其坐标。假设摄像机的焦距为 f ，根据透视投影有如下表达式：

$$\begin{cases} x = f \cdot \frac{x_c}{z_c} \\ y = f \cdot \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (2-8)$$

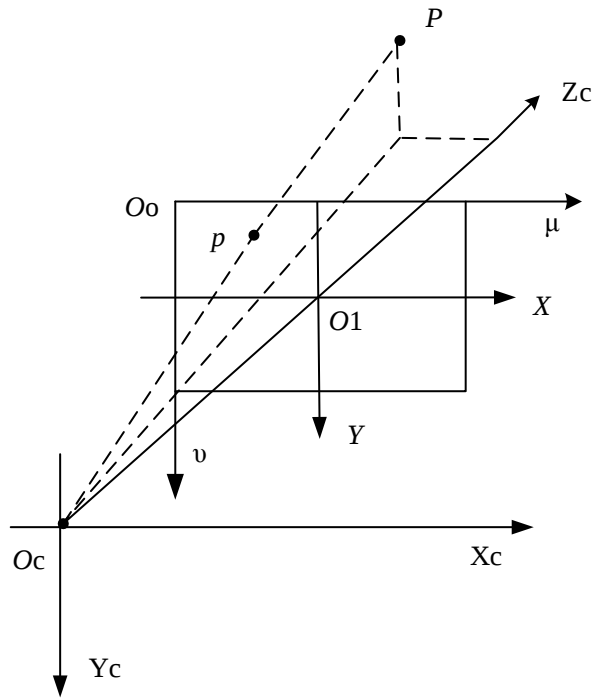


图 2-7 针孔成像模型原理

对公式 (2-8) 进一步变形得：

$$z_c \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

其中，表达式中的参数 f ， μ_0 ， v_0 ， dx ， dy 只与其内部结构相关，定义它们为内部参数。

其实公式 (2-9) 所描述的就是摄像机坐标系与图像坐标系之间的关系。为了得到世界坐标系中的物点在像素坐标中相应的位置，需要先将世界坐标系转换成摄像机坐标系，那么就需要两坐标系之间的转换关系。

公式 (2-6) 描述的就是上述两个坐标系之间的转换关系，公式 (2-7) 描述的是像素坐标和图像坐标之间的转换关系。下面将公式 (2-6)、(2-7) 带入公式 (2-9) 中，有以下变换过程：

$$\begin{aligned}
z_c \cdot \begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot X_w = \mathbf{M} \cdot X_w
\end{aligned} \tag{2-10}$$

公式(2-10)就是摄像机的针孔模型，描述出了像素坐标系与世界坐标系的相互转换。其中， $\alpha = f/dx$ 、 $\beta = f/dy$ 为摄像机分别在坐标轴 X 、 Y 方向上的聚焦长度。 $\mathbf{M}$ 称为投影矩阵，矩阵 $\mathbf{M}_1$ 仅与内部参数相关，称之为内参数矩阵，矩阵 $\mathbf{M}_2$ 由摄像机相对于世界坐标系的位置确定，故称之为外部参数矩阵。

正交矩阵 R 中尽管有九个参数，但其只与三个独立的角度参数相关，另外，矩阵 T 中的三个参数，共计六个参数^[14]。这些参数所描述了摄像机参考世界坐标的相对方位，这六个参数一般称之为像机的外部参数，确定这些内部和外部参数的过程称为摄像机标定。

2.2.1.3 摄像机非线性模型

摄像机的线性模型作为最简单的、理想情况下的成像模型，但现实中由于摄像机镜头存在加工和安装等方面的影响，线性摄像机模型并不能准确地描述其成像的几何关系，尤其是在远离图像的中心的边缘处会产生比较大的畸变，下面讨论能更加良好地描述摄像机的模型，即非线性模型。

学者 Tsai 于1986年创建的非线性模型其中提到摄像机镜头的畸变误差主要由径向轴对称畸变造成的^[24]，其模型如图 2-8 所示，畸变误差的数学表达式描述如下：

$$\begin{cases} \delta_x = x(k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + \dots) \\ \delta_y = y(k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + \dots) \end{cases} \tag{2-11}$$

其中，参数 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 是图像坐标系的像点 (x, y) 到摄像机的中心点 O_c 的距离， k_1 、 k_2 径向轴对称的畸变误差系数。

Weng 等学者在 1992 年对 Tsai 提出的模型进行了完善，认为不仅存在径向轴对称畸变，还存在切向畸变和径向畸变等非径向轴对称的畸变^[25]，如图 2-9 所示。一般认为摄像机的畸变类型如下：

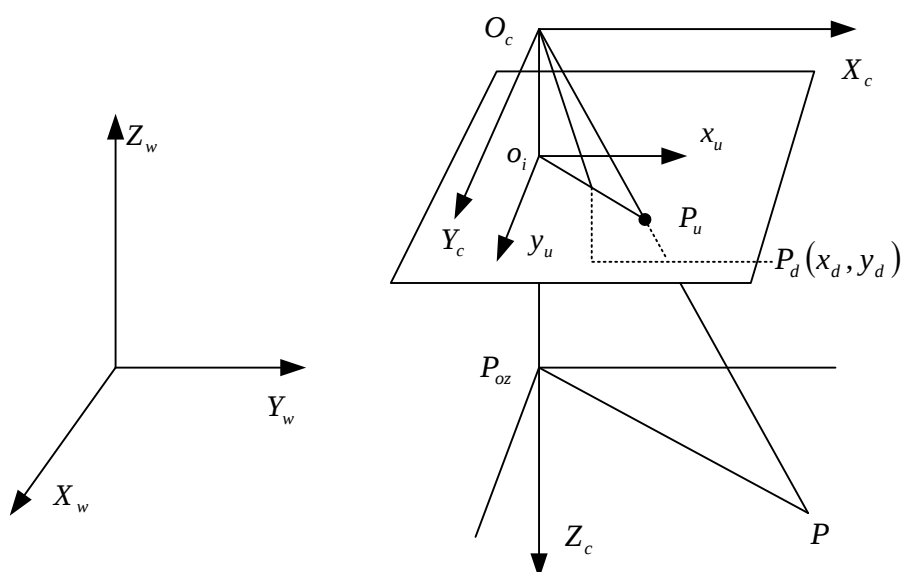


图 2-8 Tsai 提出的非线性摄像机模型

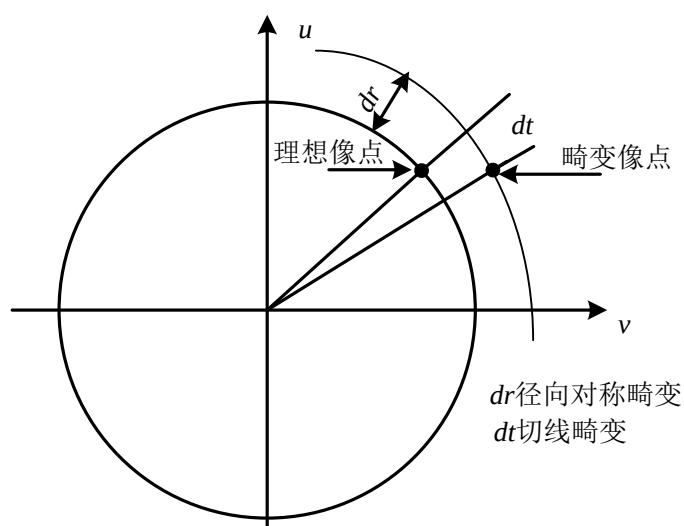


图 2-9 切向畸变和径向畸变的示意图

(1) 径向畸变。与 Tsai 所提出的畸变类型相一致，其基本特点是由于摄像机镜片的缺陷误差引起的，误差大小与像点距离摄像机镜头光心的远近有关。其在坐标轴 u 和 v 上的误差分量可以表示为：

$$\begin{cases} \delta_{ur} = k_1 u(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \\ \delta_{vr} = k_1 v(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \end{cases} \quad (2-12)$$

(2) 偏心畸变。是由于摄像机的透镜组中各透镜的中心不在一条直线所造成，也就导致了成像过程的畸变包括径向和切向两个方向的畸变，其在坐标轴 u 和 v 上

的误差分量可以表示为：

$$\begin{cases} \delta_{ud} = p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vd} = p_2(u^2 + 3v^2) + 2p_1uv + O[(u, v)^4] \end{cases} \quad (2-13)$$

式中， p_1 、 p_2 称为偏心畸变的误差系数。

(3) 薄棱镜畸变。是由于摄像机镜片的设计缺陷与安装失误所造成的畸变。其在坐标轴 u 和 v 上的误差分量可以表示为：

$$\begin{cases} \delta_{ut} = s_1(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vt} = s_2(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \end{cases} \quad (2-14)$$

式中， s_1 、 s_2 称为薄棱镜畸变的误差系数。

在考虑以上三种摄像机畸变后，摄像机的非线性模型可以表示为：

$$\begin{cases} \delta_u(u, v) = s_1(u^2 + v^2) + 3p_1u^2 + p_1v^2 + 2p_2uv + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) = s_2(u^2 + v^2) + 2p_1uv + p_2u^2 + 3p_2v^2 + k_1v(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (2-15)$$

下面让 $g_1 = s_1 + p_1$ ， $g_2 = s_2 + p_2$ ， $g_3 = 2p_1$ ， $g_4 = 2p_2$ ，那么公式 (2-15) 变成：

$$\begin{cases} \delta_u(u, v) = (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) = g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (2-16)$$

由此可见，Tasi 提出的模型仅是 Weng 所提模型的简化形式。但是 Tasi 曾说到，在利用非线性模型进行摄像机定标时，由于考虑非线性畸变的情况，所以需要利用到非线性优化算法，然而这样会导致过多的非线性参数，这种情况下通常不但不能提高精度，甚至会导致解的不稳定^[26]。一般情况下，只需考虑径向畸变就可以很好的描述非线性摄像机模型。

2.2.2 线结构光三目传感器标定技术

摄像机标定，就是利用摄像机成像模型建立世界坐标系的三维物点与图像坐标系的二维像点一一对应关系的过程。具体地讲，就是依据摄像机模型通过实验和计算求出摄像机的两组参数（包括用于刚体变换的外部参数和摄像机的内部参数）的过程^[27-28]。机器视觉测量系统的根本任务就是从摄像机所捕获的图像信息中，通过算法计算并分析三维空间中物体的形状、轮廓等参数信息，所以说摄像机标定是机器视觉系统的基础，标定的精度决定了机器视觉测量系统的准确度。

本文提出的线结构光三目传感器标定技术，可以很好地满足本测量系统的标定要求，且能够通过误差补偿来进一步提高精度，经实验验证效果明显。

2.2.2.1 三目摄像机标定基础

摄像机标定的概念起源于摄影测量学，随着机器视觉技术在过去二十多年的不断发展和广泛应用，在不同应用背景的前提下，提出许多不同的标定方法。从广义上来说，摄像机的标定方法主要分为三类：主动视觉摄像机标定方法、摄像机自标定法、传统摄像机标定方法^[26,29-31]。

表 2-2 中对三种摄像机标定方法的优缺点进行了对比，一般情况下，对于要求标定精度高且摄像机的各参数稳定的场合下，应首选传统摄像机标定方法，其中 Tsai 提出的两步法可以作为传统标定方法的代表，使用最为广泛。

表 2-2 三种摄像机标定方法的对比

标定方法 \ 优缺点对比	优点	缺点
主动视觉摄像机标定方法	适用范围广，算法简单，较高鲁棒性	系统成本高，实验设备昂贵，实验条件高
摄像机自标定方法	标定过程简单，灵活性高，能适合于各种成像模型摄像机标定	标定精度低
传统摄像机标定方法	精度高，较高鲁棒性	校准过程较复杂，需要已知尺寸的标定物

两步法（Two-Stage），是在 1986 年，由 Tsai 在 SPIE 会议上提出的。首先利用线性变换或透视变换矩阵的方法求得摄像机的部分参数，然后以求得的这些参数作为初始值，考虑因摄像机镜头缺陷引起的畸变的影响，利用最优化算法进一步提高标定精度，此过程即为两步法^[32]。

在 2.2.1.3 节中，经研究可知，考虑摄像机的畸变时，非线性模型可以看做是线性模型在成像点的位置附近发生了偏移，所以非线性模型可以描述如下：

$$\begin{cases} u_d = u + \delta_u(u, v) \\ v_d = v + \delta_v(u, v) \end{cases} \quad (2-17)$$

式中， (u_d, v_d) 表示线性模型下某一像点的坐标，而 (u, v) 为对应像点的实际坐标， $\delta_u(u, v)$ 和 $\delta_v(u, v)$ 称作非线性畸变的校正参数。

假设摄像机中 CCD 像素对应的物理尺寸 d_x 和 d_y 由制造商提供，为已知变量，只需考虑径向畸变的情况下，公式（2-17）可简化为：

$$\begin{cases} u_d = u + ku(u^2 + v^2) \\ v_d = v + kv(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (2-18)$$

Tsai 两步法的基本步骤如下：

第一步：求解部分外部参数。根据摄像机 $O_c X_c Y_c$ 平面与图像坐标系之间的平行关系，由公式 (2-4)、(2-5)、(2-7) 和 (2-8) 可得：

$$\frac{u}{v} = \frac{x_c}{y_c} = \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + t_x}{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + t_y} \quad (2-19)$$

对上式进行矩阵变换得到：

$$\begin{bmatrix} vx_w & vy_w & vz_w & v & -ux_w & -uy_w & -uz_w \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1/t_y \\ r_2/t_y \\ r_3/t_y \\ t_x/t_y \\ r_4/t_y \\ r_5/t_y \\ r_6/t_y \end{bmatrix} = u \quad (2-20)$$

由于公式 (2-20) 只有 7 个未知数，所以通过将 $N \geq 7$ 个特征点 (u_i, v_i) 带入公式 (2-19)，同时利用 R 的正交特性，就能够求得部分外部参数（即矩阵 R 和矩阵 T 中的 t_x 和 t_y ）。

第二步：求解内部参数。考虑畸变的影响，则公式 (2-8) 等价于：

$$\begin{cases} u_d = \frac{f \cdot x_c}{z_c} = u(1 + k(u^2 + v^2)) \\ v_d = \frac{f \cdot y_c}{z_c} = v(1 + k(u^2 + v^2)) \end{cases} \quad (2-21)$$

现在，令 $H_x = r_1 x_w + r_2 y_w + t_x$ ， $H_y = r_4 x_w + r_5 y_w + t_x$ ， $W = r_7 x_w + r_8 y_w$ ， $f_k = f \times k$ 上式可转换为：

$$\begin{cases} H_x \cdot f + H_x \cdot (u^2 + v^2) \cdot f_k - u \cdot t_z = u \cdot W \\ H_y \cdot f + H_y \cdot (u^2 + v^2) \cdot f_k - v \cdot t_z = v \cdot W \end{cases} \quad (2-22)$$

然后可以利用最小二乘法进行迭代求解，则可求出 f 、 k 、 t_z 的值。也就是摄像机的外部参数。至此也就得到了摄像机标定所需的内外参数。

总的来说，Tsai 两步法虽然引入非线性畸变（径向畸变），提高了标定精度，但由于其没有考虑切向畸变等其他畸变的影响，也就无法实现更精确的标定。

由于高温钢坯机器视觉在线检测系统中，摄像机为固定的，摄像机在进行前期视角调整后进行锁死，而两步法是通过摄像机从多个角度捕获多幅标定物的图像来实现的，所以将两步法直接应用到多传感器测量系统中是不现实的。在本测

量系统中三个摄像机分别放在被测钢坯的左、右、上用于捕获其左、右、上的表面光带图像，且每两幅图像的重叠区域有限，所以存在摄像机之间的位置关系和图像之间的配准融合问题，因此本测量系统中采取先单独标定后图像融合的标定方法。本文提出了线结构光三目传感器标定方法^[33-35]，本方法主要包括三目摄像机标定和标定误差校正两部分。

在测量系统完成装配后，分别调节三个摄像机的固定支架及水平旋转轴，使得钢坯的表面轮廓图像全部都在三个摄像机的视场内，且每两个像机视野内的图像存在一定的重叠，方便观察后面的图像融合情况，并锁死放置摄像机的装置；然后进行线激光器的调整，首先对三支线激光器的一维移位平台进行粗略调整，使其近似共面，然后通过对线激光器的摆弧臂进行微调，进而使其共面。其原理示意图，如图 2-10 所示。

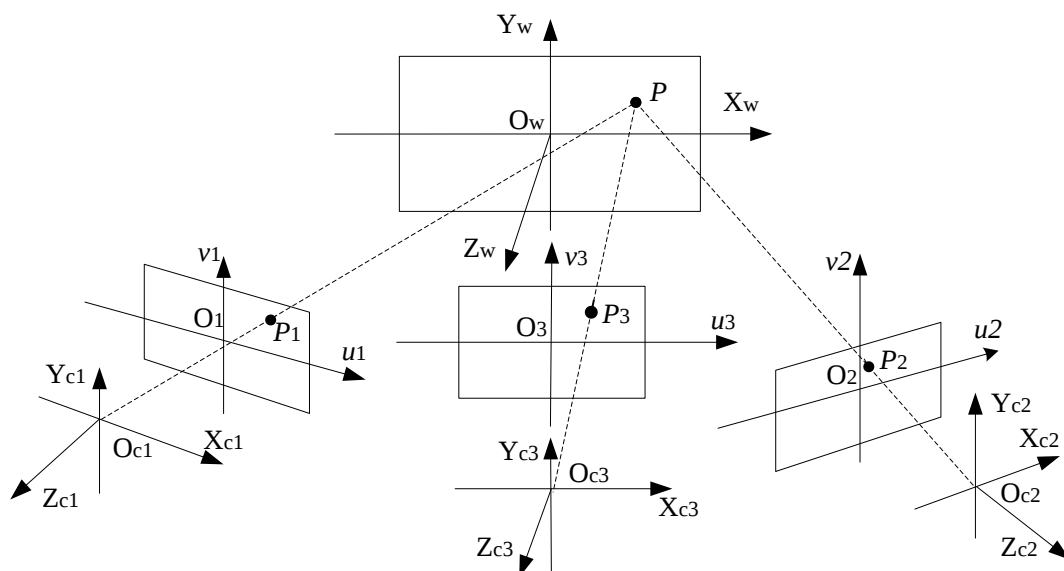


图 2-10 三目摄像标定原理示意图

其中， $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系，以标定板所在平面为 $O_w X_w Y_w$ 面，为钢坯行进方向的反方向为坐标轴 Z_w 的方向； $O_{c1} - X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 、 $O_{c2} - X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ 和 $O_{c3} - X_{c3} Y_{c3} Z_{c3}$ 作为右摄像机、左摄像机、和上摄像机的摄像机坐标系， O_{c1} 、 O_{c2} 和 O_{c3} 为各个镜头的光心，坐标轴 Z_{c1} 、 Z_{c2} 和 Z_{c3} 分别与右摄像机、左摄像机、和上摄像机的光轴所在直线重合，且相交于点 O_w ； $O_1 - \mu_1 v_1$ 、 $O_2 - \mu_2 v_2$ 和 $O_3 - \mu_3 v_3$ 分别为右摄像机、左摄像机和上摄像机的图像坐标系，且分别与平面 $O_{c1} - X_{c1} Y_{c1}$ 、 $O_{c2} - X_{c2} Y_{c2}$ 和 $O_{c3} - X_{c3} Y_{c3}$ 平行；点 P 为选取于标定板所在面的参考特征点， P_1 、 P_2 和 P_3 为点 P 在右摄像机、左摄像机、和上摄像机所对应的图像坐标系中像点的坐

标。高温钢坯垂直于线激光面向前输送，线激光平面会在经过的钢坯的表面投射出一个环形的激光光带，左摄像机、右摄像机、和上摄像机用于分别捕获钢坯的左、右和上部分的轮廓光带^[19]。

2.2.2.2 三目摄像机标定理论

摄像机捕获空间某一物点的过程，要经过刚体变换、镜头畸变、摄投影变换等光路变换最终到达摄像机并在其 CCD 平面成像^[35]。鉴于光路的变换是连续、对偶的，利用矩阵方面的知识可以对光路变换矩阵部分合并，得到简化的变换矩阵；Zhang 在其提出的平面标定过程中对摄像机的内外部参数都有所弱化，对外部参数 f 和 k 甚至并没有计算，而是将其隐藏在内部参数的矩阵中。据此，本文中的标定方法，对摄像机的内外参数矩阵进行合并、简化后有如下表达式：

$$\begin{cases} x = a + bu + cv + du^2 + euv + fv^2 \\ y = g + hu + iv + ju^2 + kuv + lv^2 \end{cases} \quad (2-23)$$

利用矩阵进行变换，有：

$$\begin{bmatrix} a & b & c & d & e & f \\ g & h & i & j & k & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & u & v & u^2 & uv & v^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

其中，舍去了二次项参数以上的高幂次项，一次项为旋转平移映射的关系式，二次项作为畸变修正，用于增强稳定性；参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 、 j 、 k 、 l 共 12 个为待定的标定系数，称之为隐参数； (x, y) 表示标定板平面中某个特征点的坐标，位于世界坐标系中，基本单位为毫米； (u, v) 位于图像坐标系中，是特征点 (x, y) 对应于像素坐标的点，基本单位为像素。

在制作高精度的平面标定板时，以左下角的点作为其原点，并确定好每个特征点的坐标（单位为毫米），且标定板上有以标定板的中心点为圆心，直径大于 55 mm 的圆，这是为了方便调整摄像机的视场可以覆盖到最大尺寸（55 mm）的钢坯，使测量系统无检测盲点，标定板的实物图如图 2-11 所示。在摄像机捕获到标定板的图像后，每个特征点在图像坐标系中的像素坐标点便可以知道，然后利用公式（2-24）便可求得标定参数。不过为了提升标定的精度，会选取大于隐参数个数的参考点，参考点的选取规则是：尽量选取有效测量范围内的点并且要尽可能呈均匀分布，最后通过最小二乘法可以求得标定参数的最优解。

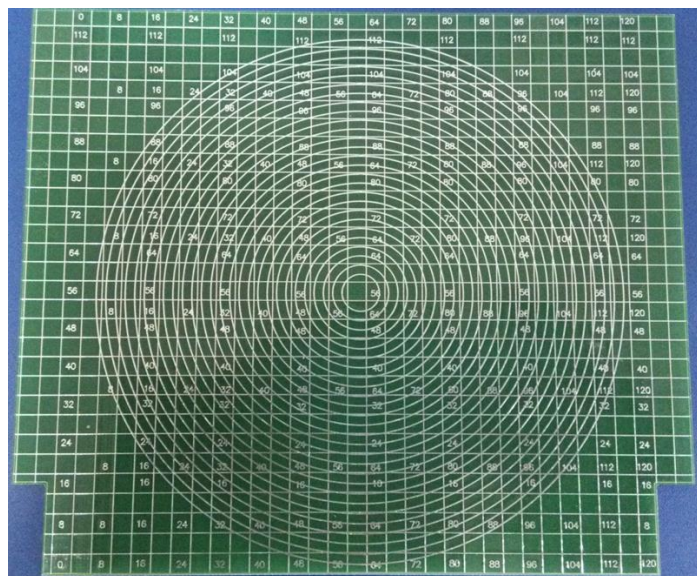


图 2-11 标定板实物图

假设选取 N ($N \geq 6$) 个世界坐标系 ($O_w X_w Y_w$ 面) 中的点作为参考点, 相应的像点坐标可构造如下的 $2N \times 12$ 矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & u_1 & v_1 & u_1^2 & u_1 v_1 & v_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & u_2 & v_2 & u_2^2 & u_2 v_2 & v_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ 1 & u_n & v_n & u_n^2 & u_n v_n & v_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_1 & v_1 & u_1^2 & u_1 v_1 & v_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_2 & v_2 & u_2^2 & u_2 v_2 & v_2^2 \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_n & v_n & u_n^2 & u_n v_n & v_n^2 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

N 个特征点可构造如下的 $2N \times 1$ 矩阵 B :

$$B = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n \ y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n]^T \quad (2-26)$$

12 个隐参数则可构造如下的 12×1 矩阵 C :

$$C = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g \ h \ i \ j \ k \ l]^T \quad (2-27)$$

那么, 公式 (2-24) 可以转换成如下的形式:

$$AC = B \quad (2-28)$$

根据矩阵性质: $AA^{-1} = A^{-1}A = E$ (E 为单位矩阵), 对上式进行矩阵运算:

$$A^{-1}AC = A^{-1}B \rightarrow C = A^{-1}(A^T)^{-1}A^TB \rightarrow C = (A^TA)^{-1}A^TB \quad (2-29)$$

通过将 N 组已知点坐标值代入上式便可以计算出这 12 个未知参数，即标定系数。当摄像机捕获钢坯轮廓信息的图像后，根据公式 (2-23) 便可以计算出图像中每一点在世界坐标中所对应的坐标，这就完成了单个摄像机的标定过程。

另外，摄像机标定过程所采用的世界坐标系为以同一个标定板建立起来的，是同一个坐标系。因此对钢坯轮廓图像进行标定还原后可以直接进行图像的叠加便能够得到完整的钢坯轮廓图像，进而实现了无需使用复杂的图像匹配和融合的算法，便可以在保证系统测量精度的前提下，实现了算法运行速度的提高。

2.2.2.3 系统标定误差的校正

通过以上标定过程完成摄像机标定后，摄像机获取钢坯轮廓的光带图像后，进行标定还原之后，进行叠加得到融合后的钢坯图像，之后进行一系列算法处理，最终得到单像素的钢坯轮廓。然而在进行实验或在线测量后发现，前期融合效果很好的图像，在最终获得的单像素的钢坯轮廓融合图中，每个摄像机获取的轮廓之间存在较大的偏差，并且对得到的钢坯轮廓的尺寸数据与标准尺寸数据进行对比，发现所得数据存在较大的偏差，即最终得到的钢坯轮廓尺度有一定程度的失真。

通过大量的实验分析，最终发现导致钢坯轮廓尺寸失真的主要原因主要分为两部分：首先就是标定误差引起的，特别是对特征点的选取方面，目前为止采用的是手动点击获取特征点的方法，故存在一定的误差；其次是每个摄像机在获取钢坯的轮廓光带图像后，需要经过一系列的预处理，其中经过细化处理进而获得一条单像素轮廓，再对处理后的图像进行还原，最终得到一幅非畸变的钢坯轮廓图像。在经过图像细化操作后，无法确保获得的单像素轮廓面与世界坐标系中的 $O_wX_wY_w$ 面（前期标定时标定板所在平面）同在一个平面^[36-37]，造成了最终钢坯轮廓尺寸数据的失真，这也是重要的原因，下面将着重分析此原因导致的失真。

基本原理是：单像素轮廓面位于 $O_wX_wY_w$ 面的后方时，导致最终测量的轮廓尺度数据偏大，反之偏小。假定单像素轮廓面位于 $O_wX_wY_w$ 面的前方（另一情况类似），图 2-12 是左摄像机误差分析的示意图，下面只分析钢坯轮廓上的某点在世界坐标系 x 轴方向和其对应的像点在图像坐标系 u 轴方向的标定误差，公式 (2-23) 说明其在 y 轴方向和其对应 v 轴方向的误差分析以此类似，故不再做分析。

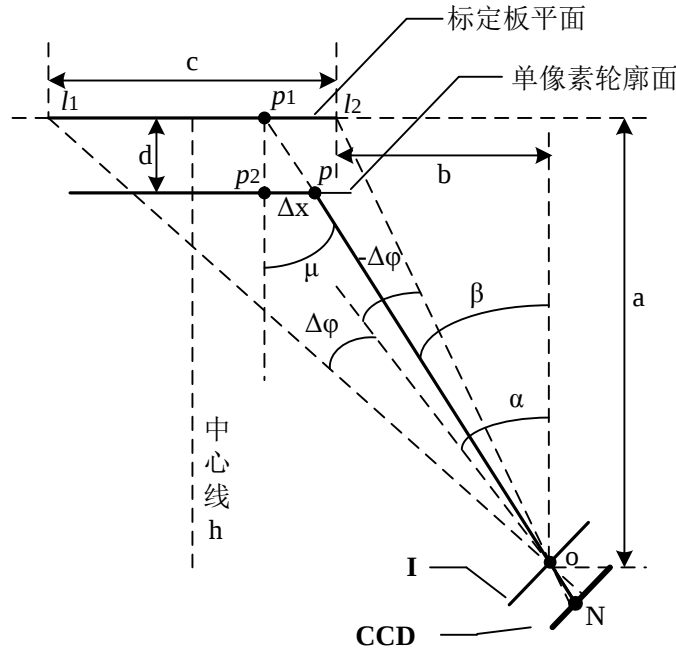


图 2-12 左摄像机标定误差示意图

图中， I 为像机镜头透镜，点 o 为透镜的光心； a 为点 o 到定标板所在平面的垂直距离， b 为点 o 到有效标定区域边缘的垂直距离， c 表示标定板有效区域的长度， $G = c/\sqrt{a^2 + b^2}$ 表示距离比重； l_1 、 l_2 是标定板有效区域的两个边缘端点， h 为标定板有效区域的中心线， α 为角 l_1ol_2 的角平分线与 h 的夹角， $\pm\Delta\phi$ 表示角 l_1ol_2 的角平分线分成的两个夹角； p 为单像素轮廓面上的某一物点， N 为点 p 位于 CCD 上对应像点， p_1 为 op 的延长线在标定板平面上的交点，表示像点 N 标定还原后对应世界坐标系的物点位置， p_2 为经过 p_1 做垂线与单像素轮廓面的交点， β 为 op 与 h 的夹角； d 为标定板平面与单像素轮廓面之间的距离， Δx 为点 p_2 到点 p 的距离，称之为在 x 方向的标定误差。在标定过程中，由于镜头的畸变、调整模块的精度等系统误差的存在，必然使得光带图像的单像素轮廓面和标定板平面会存在一定的前后平移，即存在误差距离 d ，其中 d 的大小直接决定 Δx 的大小， Δx 的大小表示了钢坯轮廓测量系统的精度^[19]。下面是具体分析推导过程：

单像素的轮廓面与标定板平面可近似认为是相对固定的两个平行面，此时 d 则为常数，角度 β 与 α 之间有如下关系式：

$$\beta = \alpha + \theta, -\Delta\phi \leq \theta \leq \Delta\phi \quad (2-30)$$

由平行三角形的性质可得：

$$\tan \beta = \tan \mu = \frac{\Delta x}{d} \quad (2-31)$$

由公式 (2-30) 和 (2-31) 可得：

$$\Delta x = (\tan \alpha + \frac{\tan \alpha^2 \cdot \tan \theta + \tan \theta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \theta}) \cdot d \quad (2-32)$$

其中， α 与 d 均为已知，令 $B = \tan \alpha$ ， $A = d \tan \alpha$ 。上式转换为：

$$\Delta x = A + \frac{B^2 + 1}{\frac{1}{\tan \theta} - B} d \quad (2-33)$$

由上式可以看出， Δx 只与 θ 有关系，靠近中心偏差小，靠近边缘偏差大。在 G 比较小的情况下，进行一定的误差补偿可以确保标定的高精度，其他两台摄像机的情况与此类似。

利用函数逼近的原理，对 $(\Delta x, \Delta y)$ 利用最小二乘法进行函数逼近，然后将 $(\Delta x, \Delta y)$ 补偿融合图像中。

如果对每个摄像机分别对 $(\Delta x, \Delta y)$ 进行数据拟合将会变得复杂，且对高速的 ($10m/s$) 轧钢生产线也是不合适的。为了减少误差补偿的算法复杂度，提高系统的测量速度，提出如下解决方案：利用三个摄像机分别获取标准的圆型钢坯的左、右和上的局部轮廓图像，首先进行一系列的图像处理，再分别对三幅图像进行标定还原以得到非畸变的轮廓图像，最后利用编写的圆心拟合算法分别求出三幅非畸变的轮廓图像在同一个世界坐标系中的圆心坐标，舍去高次幂项利用如下的线性拟合公式：

$$\begin{cases} \Delta x = p_1 + p_2 u + p_3 v \\ \Delta y = q_1 + q_2 u + q_3 v \end{cases} \quad (2-34)$$

上式中， (u, v) 表示左摄像机或者上摄像机经过以上步骤拟合出的圆心坐标，以右摄像机的图像坐标系作为参考坐标系进行标定误差补偿； $(\Delta x, \Delta y)$ 表示左摄像机或上摄像机与右摄像机拟合圆心之间的坐标差； p_1 、 p_2 、 p_3 、 q_1 、 q_2 、 q_3 为所要确定的误差补偿系数。操作过程中，将标准的圆形钢坯放在测量范围内三个任意的位罝，计算出拟合圆心坐标，代入公式 (2-34) 中便可求出左像机或者上像机各自的 6 个待定系数。

待定系数求得后，摄像机捕获钢坯轮廓图像，进行图像的预处理及标定还原分别获得左、右和上部分非畸变的钢坯轮廓图像，然后利用圆心拟合算法求得各摄像机的圆心，再将左或上摄像机的圆心 $(u_{0左}, v_{0左})$ 和 $(u_{0右}, v_{0右})$ 代入到公式 (2-34) 中便可求得左或上摄像机的坐标误差补偿 $(\Delta x_{左}, \Delta y_{左})$ 和 $(\Delta x_{上}, \Delta y_{上})$ ，最后把 $(\Delta x_{左}, \Delta y_{左})$ 和 $(\Delta x_{上}, \Delta y_{上})$ 进行反向补偿到图像中，实现了系统标定的误差校正。

2.2.2.4 系统标定实验及结果

图 2-13 所示为摄像机的标定过程，上一节已经描述过标定过程的基本步骤，此处不再赘述，只说明一下标定板的一些特点，标定所用标定板为专门订制，每一方形网格为 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的大小，每个交叉点都可作为特征参考点，以左下角的点为原点。标定过程中特征点的选取要尽量在有效测量范围内呈均匀分布，此处选取 25 个特征点用于标定，并且利用这 25 个特征点生成公式 2-29 中的矩阵 B 。如图 2-14 所示为左、右、上摄像机捕获到的标定板畸变图像。



图 2-13 系统框架实物图及摄像机标定过程

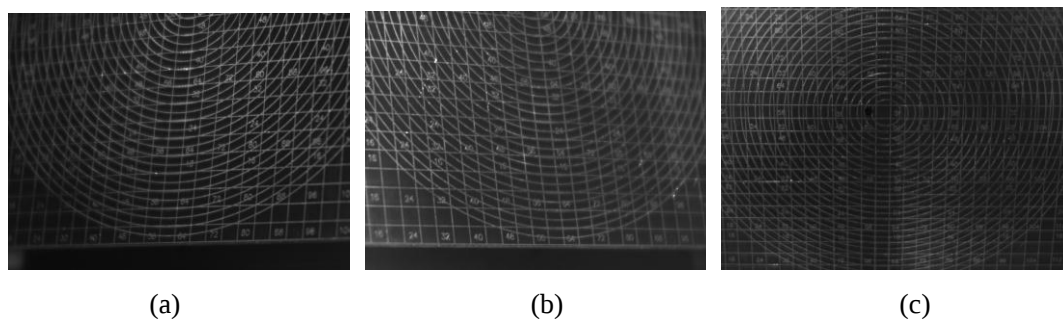


图 2-14 摄像机捕获的标定板图像

(a) 左摄像机捕获的标定板图像；(b) 右摄像机捕获的标定板图像；(c) 上摄像机捕获的标定板图像

对三个摄像机所捕获的图像，分别利用对应的标定程序，通过角点检测分别求出上述 25 个特征点在图像坐标系（图像的左下角作为原点）中的坐标，并且生成公式 2-29 中的矩阵 A ，再将矩阵 A 和 B 代入到公式 2-29 中，便可计算出矩阵 C ，对应的 12 个隐参数也就计算出来了，摄像机的标定过程完成。标定参数如表 2-3、表 2-4 和表 2-5 所示。

表 2-3 左摄像机对应的12个标定参数($mm / pixel$)

a	b	c	d	e	f
-0.000026	0.000014	-0.000002	0.155258	-0.016591	14.942499
g	h	i	j	k	l
0.000001	-0.000024	0.000015	-0.001959	0.124290	-9.141023

表 2-4 右摄像机对应的12个标定参数($mm / pixel$)

a	b	c	d	e	f
0.000028	0.000017	0.000004	0.119839	0.009446	10.574359
g	h	i	j	k	l
0.000001	0.000026	0.000013	-0.001635	0.108542	-8.749699

表 2-5 上摄像机对应的12个标定参数($mm / pixel$)

a	b	c	d	e	f
0.000000	-0.000035	0.000000	0.161002	0.008540	10.899465
g	h	i	j	k	l
-0.000001	0.000000	-0.000040	0.001226	0.190128	2.322524

再利用求得的标定参数对图 2-14 中的图像进行标定还原,结果如图 2-15 所示。

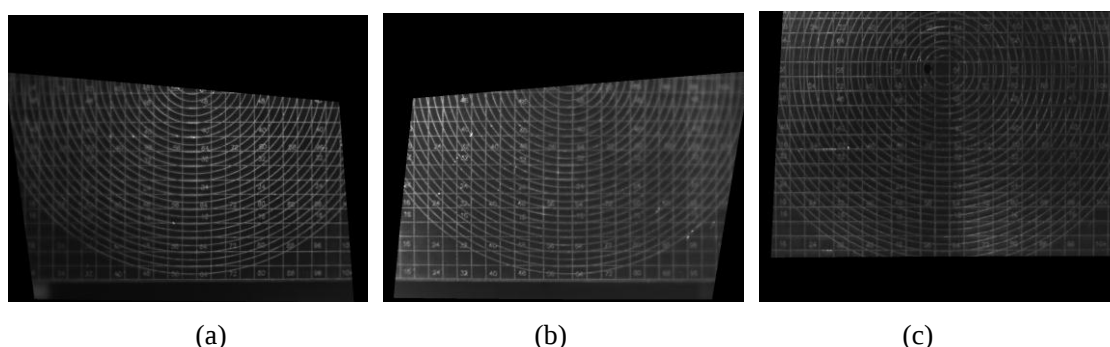


图 2-15 摄像机标定还原后的图像

(a) 左摄像机捕获的还原后图像; (b) 右摄像机捕获的还原后图像; (c)上摄像机捕获的还原后图像

通过上面步骤计算得到 12×3 个标定参数,下一步需要进行标定误差的校正,下面利用如图 2-16 所示的,直径为 $23mm$ 的标准圆型工件进行误差校正,以便获得更好的校正结果。使工件在有效测量范围内移动,所得到的标定参数自动读取到标定误差的校正程序中,通过前面所述算法计算出各摄像机的拟合圆心及左、

上摄像机与右像机的圆心差值。

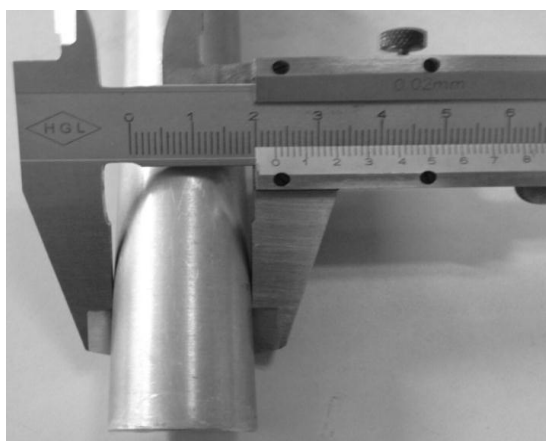


图 2-16 23 mm 直径的标准圆形工件

上述步骤中所得的数据代入到公式 (2-34)，分别求出左像机与上像机相对于右像机的误差补偿系数，分别如表 2-6 和表 2-7 所示。

表 2-6 左像机相对于右像机的误差补偿系数(单位 mm)

p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
3.541964	-0.024393	0.006831	0.000034	0.000017	-0.000008

表 2-7 上像机相对于右像机的误差补偿系数(单位 mm)

p_1	p_2	p_3	q_1	q_2	q_3
1.118870	-0.008546	-0.001601	0.000013	0.000006	-0.000001

图 2-17 是进行误差校正前后的轮廓图像对比图，其中 (a) 是标定误差校正之前左、右和上像机捕获图像融合后进行轮廓提取后的钢坯单像素轮廓图像。而 (b) 是将误差补偿系数补偿到测量系统之后所得到的钢坯单像素轮廓图像，拟合圆心的坐标误差 1 个像素内。

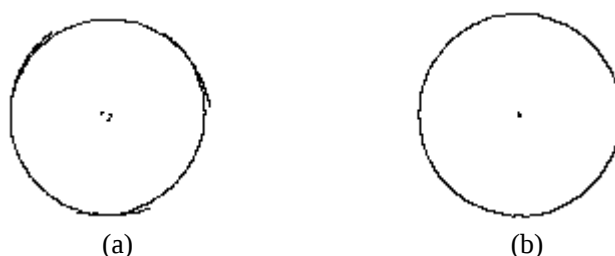


图 2-17 误差校正前后的轮廓图像对比图

(a) 误差校正前的轮廓图像；(b) 误差校正后的轮廓图像

2.3 软件开发环境介绍

应用程序框架（Application Framework）的出现使得程序的编写变得异常方便和简单，它就像一个汽车装配厂一样，装配一辆汽车可以根据不同的需求，使用不同的零件。应用程序框架已经给我们提供了大量且优秀的类供我们使用。本软件系统也是基于 Application Framework 进行开发的。具体的开发环境是在微软的 Windows XP with SP3 专业版操作系统下，基于 Visual C++ 6.0 开发平台，利用 MFC（Microsoft Foundation Classes 的简写）作为系统的 Application Framework。

MFC（Microsoft Foundation Classes）是美国的微软（Microsoft）公司利用先进的面向对象编程（Object Oriented Programming, OOP）技术对 Windows APIs 函数进行封装所实现的一个 C++ 类库。Document/View 结构的提出，是的基于 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，便于面型对象模块化编程，提高了编程的效率，降低了数据维护的成本。

2.4 高温钢坯在线检测系统介绍

根据前述的技术理论要求，在经过长期的实验优化，测量系统的硬件结构采用如图 2-18 所示的设计。线结构光光源部分采用三个共面的线结构激光器，呈 120° 夹角均匀分布，系统的图像采集利用三个面对称的摄像机。调节三个激光器使其所在平面共面，当线激光到达钢坯后，表面就会形成一个共线的环状光带，同时通过摄像机进行图像捕获，再通过千兆网线传送到计算机通过软件系统进行图像数据处理最终得到钢坯轮廓；进行表面裂纹检测的时候，通过计算机控制，对线激光器进行关闭操作，三个摄像机分别获取同一时刻的不同视角的钢坯表面的灰度图像，通过软件系统根据裂纹检测算法判断钢坯表面是否存在裂纹。

轧钢生产中，根据客户的实际需求不同，不仅会生产不同钢型的产品，如圆钢、六角钢等，同一钢型也会有多种不同的尺寸，在实地测量实验过程中发现，若利用两个摄像机对钢坯图像进行捕获，则在对大尺寸钢坯进行测量时，无法捕获到其完整的图像，所以本文采用三个摄像机对称分布的设计方案，可以获得 360° 的钢坯表面图像，完全避免前期使用两个摄像机在测量大尺寸钢坯时所带来测量盲区，能够完整获得钢坯表面图像，以便进行轮廓检测和裂纹检测；同时根据实际需求，开发了基于三目摄像机的标定技术，明显提高了测量系统标定的准确性。

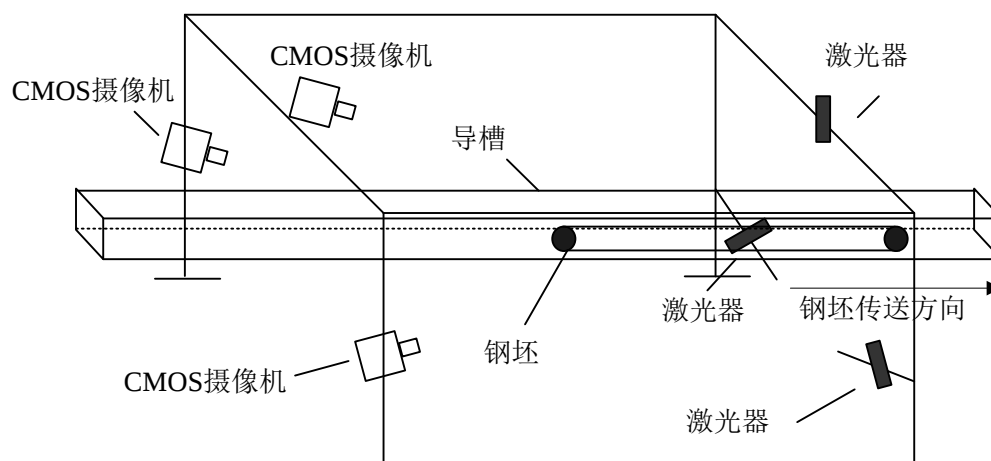


图 2-18 测量系统硬件结构设计图

测量系统硬件整体结构设计方面，考虑到轧钢所处的高温、高湿度、高粉尘和高抖动的恶劣环境，所以必须考虑到测量系统整体结构的防尘、耐高温、稳定和牢靠性。在框架材料的选择上考虑到铝合金具有重量轻、强度高、导热性好且易加工的优秀特点，因此采用铝合金材料用来设计系统硬件框架。

2.5 本章小结

本章首先介绍了系统中所用技术，包括线结构光的机器视觉轮廓测量技术、三目传感器标定技术等，上述技术都是开展软件系统开发的重要前提，没有这些技术软件系统也就无从谈起；另外对软件开发环境以及系统本身进行了介绍。

第三章 软件系统分析

3.1 系统的配套硬件

第二章中已经介绍了高温钢坯在线检测系统，其中图 2-18 是“高温钢坯机器视觉在线检测系统”的硬件结构设计图，根据测量系统的设计具体要求生产和加工出了与软件系统配套的硬件系统，具体包括，测量系统的框架、固定调节摄像机和激光器的设备、冷水套和防尘罩、标定板及固定装置和适配器及电源线路安装盒等。测量系统实物图如 2.2 节中的图 2-13 所示，图 3-1 所示为挂在测量系统框架左侧的适配器及电源线路安装盒。

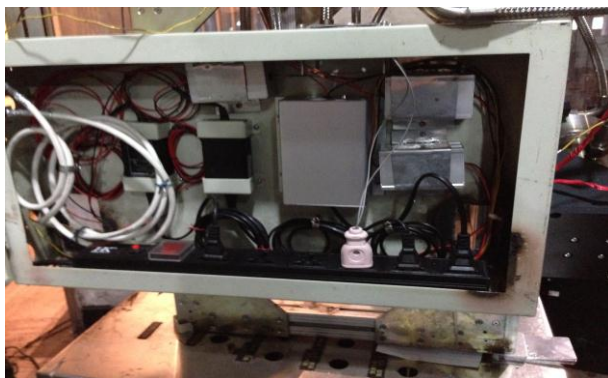


图 3-1 适配器及电源线路安装盒

除标定板及其固定装置外，其他主要硬件见表 3-1 所示的主要硬件明细表：

表 3-1 主要硬件明细表

硬件名称	生产（购买）厂商	参数	数量
摄像机	韩国 Vieworks 公司	最高帧频：264 <i>fps</i>	3 台
线激光器	西安雷泽公司	额定电压 5V；功率 1.5W 波长 808 <i>nm</i>	3 台
水冷套及防尘罩	成都英特罗克公司	不锈钢	6 套
网线	成都电脑城	六类屏蔽千兆网线（150 <i>m</i> ）	3 根
报警器	漫步者	R101V 电脑音响	1 台
计算机主机	组装	4 核心 8 线程 CPU	1 台
计算机显示屏	AOC	型号：E2270SWN 分辨率：1440*900	1 台

测量系统进行测试之前首先按照第二章 2.2.2 节的 2.2.2.2 和 2.2.2.3 小节中所述步骤进行摄像机的标定和误差的修正，然后就看可以将测量系统安装到轧钢生产线上，并利用高性能的千兆网线和控制线与计算机主机相连接，图 3-2 所示就是钢坯测量系统现场运行实物图。



图 3-2 测量系统现场运行图

3.2 系统的总体目标

高温钢坯机器视觉在线检测系统最主要的设计目的是为了高效快速的对高温钢坯的轮廓参数进行测量以及对钢坯表面裂纹信息进行检测。

钢坯轮廓测量部分，主要包括圆钢与六角钢轮廓的分别测量，同时对测量的轮廓图像及参数信息进行实时的显示，并导入到数据库实现长期保存。

钢坯表面裂纹检测部分，主要包括对左、右和上三个摄像机捕获的图像进行裂纹判断，检测是否有裂纹缺陷，若有测进行图像显示和特征参数显示，并将特征参数导入到数据库长期保存，同时保存带有裂纹的钢坯图像到本地。

3.3 系统用户分析

本测量系统用于轧钢生产线对高温钢坯进行检测，电脑主机放置于主控室里，该系统的主要操作对象是钢铁厂的一线工人，所以软件系统在保证可靠、健壮和高效率等前提下，要做到界面美观简洁、交互性好和易操作。

3.4 系统功能需求分析

测量系统的目的是对轧钢生产线的热钢坯进行实时检测，结合实际生产情况，主要功能有钢坯轮廓测量、表面裂纹检测、数据的存储、轮廓参数的波形显示、异常情况的处理和钢坯基本信息的修改等。

3.4.1 钢坯轮廓测量

钢坯的轮廓测量是通过第二章中 2.1 节的线结构光机器视觉技术实现的，针对圆钢与六角钢的不同特点，分别利用不同的测量算法进行实现。

主要实现对钢坯单像素轮廓的提取与图像实时显示以及对轮廓参数的获取与实时显示。

3.4.2 表面裂纹检测

在轧钢生产过程中，不仅需要对钢坯的轮廓进行测量，同时高温钢坯的表面可能会存在裂纹缺陷，这也是衡量钢坯质量的重要指标。

表面裂纹检测是对三个摄像机所捕获的图像分别进行的，实现无漏点的检测，检测出裂纹后，对带有裂纹的钢坯图像进行显示，并对裂纹特征参数进行显示。

3.4.3 数据的存储

前期测量系统运行过程中，只是实时显示钢坯轮廓参数信息，以及裂纹的特征参数信息，但无法查看之前的测量数据，也就无法对生产过程进行统计与评估，所以加入了数据的存储功能，这依靠数据库技术来实现。

3.4.4 轮廓参数的波形显示

钢坯轮廓参数信息是衡量轮廓好坏的主要指标，在轧钢生产过程中，能够对钢坯生产的情况进行实时直观的观察是非常有必要的，加入钢坯轮廓的波形显示功能就是通过波形图的方式实时反映生产情况，根据轮廓参数的波动情况对生产线进行及时地调整。

3.4.5 异常情况的处理

摄像机是组成测量系统非常重要的一部分，对摄像机的状态的监控显得尤为重要，当摄像机温度超过安全温度线时会通过弹出对话框并发出声音通知现场工人，对意外情况进行及时处理。

另外，当测得的钢坯轮廓参数超标或发现裂纹时进行声控报警。

3.5 系统性能需求分析

在轧钢生产线上，钢坯传送的速度大约为 10m/s，所以对测量系统的效率有很高的要求，为了解决性能需求，整个测量系统在具有 4 核 8 线程高性能 CPU 的计算机下，利用多线程技术进行开发，以提高测量系统的运行和测量性能。

3.6 本章小结

本章首先介绍了软件系统的配套硬件，介绍了软件系统的总体目标，在此基础上对软件系统的功能需求和性能需求进行了分析。

第四章 软件系统设计

4.1 设计原则

系统设计包括整体设计和详细设计，在进行系统需求分析的前提下，需进行系统设计。系统设计是系统开发的重要阶段。设计的好坏将直接关系软件的质量，系统的设计原则如下：

1) 可靠性原则：本测量系统是直接面向各大钢铁企业的，特别是软件算法方面的可靠性直接影响企业产品生产的良品率，进而对企业的效益产生影响。软件系统可靠性在于设计和实现过程中开发人员的行为，因此，可靠性需要在设计阶段就考虑进去，否则在后期若出现可靠性问题，将导致更严重的后果。

2) 鲁棒性原则：由于软件系统的用户可能在操作软件的过程中出现各种不当操作；因此，系统的鲁棒性原则就需要进行充分考虑，否则当用户有意或者无意中出现误操作时，系统就会崩溃，进而给企业造成损失。

3) 标准化原则：一整套系统开发是需要不同开发人员的参与，只有符合标准化原则，这样当开发团队有新的成员加入时，就可以快速适应开发条件，尽快投入到开发中；此外，当系统后期需要维护与升级时，采用标准化原则开发的系统可以大大减少熟悉系统所需要的时间，从而大大降低时间成本。

4) 可维护性原则：由于软件系统的开发需要消耗大量的成本，而开发完成后，还需要使用多年，因此，系统在设计阶段就需要考虑后期的维护，以便在后期提出需求时可以快速维护。

5) 模块化原则：一个系统的开发，不可能一个人来完成，需要不同开发人员的参与，每人会负责一部分的开发工作，这就是模块化。对软件系统进行模块化开发可以大大地降低开发周期。

4.2 系统框架设计

本软件系统利用单文档界面（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 4-1 所示。

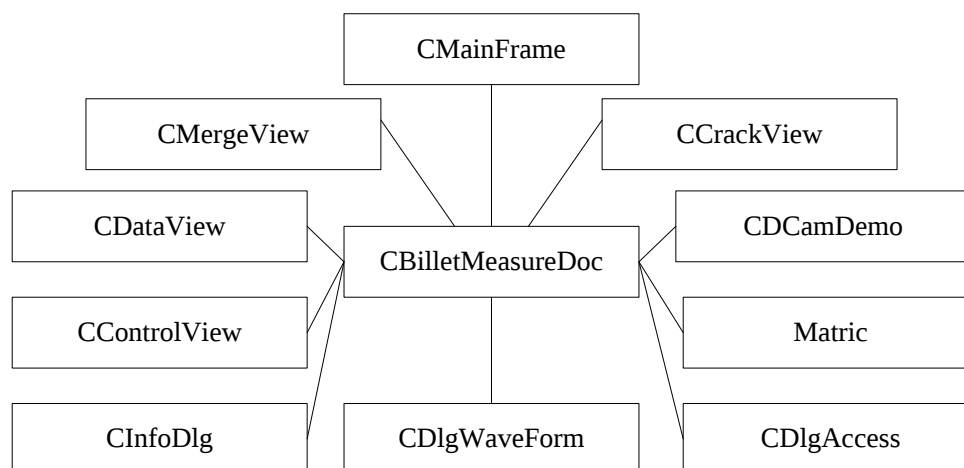


图 4-1 软件系统中所用类及结构关系

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。图 4-1 中，CView 类的派生类包括：CMergeView、CCrackView、CControlView 和 CDataView；CDialog 类的派生类包括：CInfoDlg、CDlgWaveForm 和 CDlgAccess；CDocument 类的派生类包括：CBilletMeasureDoc。CMergeView 类的主要作用是实时显示钢坯的单像素轮廓图像，CCrackView 类的主要作用是用于显示检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，CDlgWaveForm 对话框主要作用是以波形图的形式实时显示轮廓尺度参数；CDlgAccess 对话框主要作用是将钢坯轮廓参数数据实时导入到数据库中以及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轮廓和裂纹信息，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，4 个窗口对应上述中 4 个 CView 类的派生类。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。

4.3 系统整体设计

4.3.1 整体功能设计

高温钢坯在线检测系统软件设计主要包括系统初始化、钢坯图像的获取、钢坯轮廓测量、表面裂纹检测、数据的存储与查看、轮廓参数的波形显示和异常情况的处理等，整体功能设计如图 4-2 所示。

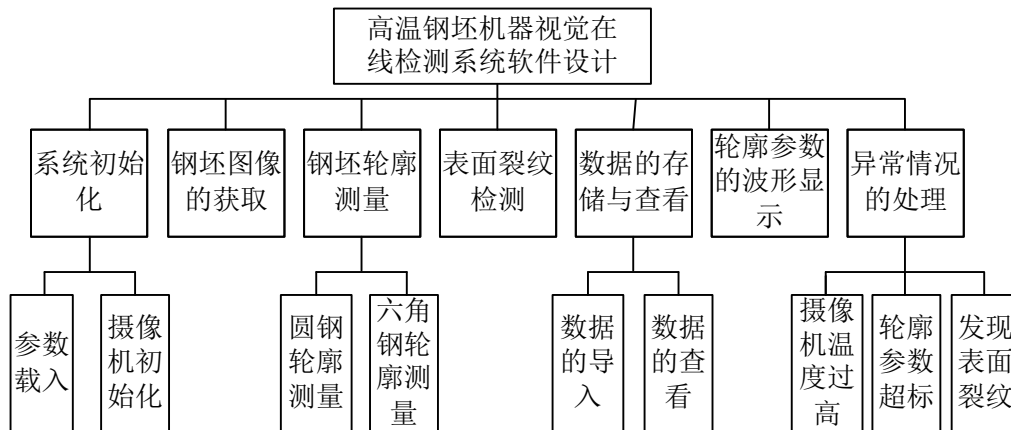


图 4-2 软件系统整体功能设计

4.3.2 系统流程设计

如图根据测量系统的要求，软件系统的基本流程设计如图 4-3 所示：

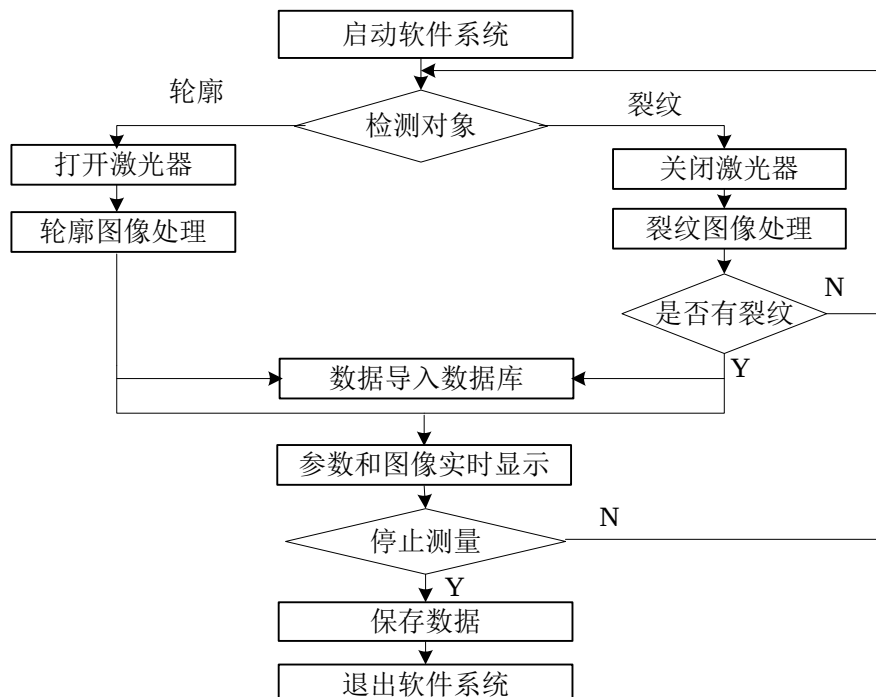


图 4-3 软件系统基本流程图

如上图所示，首先启动软件系统，接着弹出基本信息输入对话框对被测钢坯的基本信息进行设置，接着便进入软件系统主界面。选择好钢坯的类型后，便可以点击启动按钮进行钢坯在线测量。

在进行测量时，软件系统实现了两项基本的功能：对钢坯的轮廓进行测量以及对钢坯表面裂纹进行检测。测量轮廓时将轮廓图像和参数数据实时显示，并导入到数据库中保存；裂纹检测时，如果钢坯表面有裂纹，将带裂纹的图像和相关参数数据进行显示，同时将参数信息导入到数据库。

4.4 系统功能模块详细设计

4.4.1 系统初始化模块

系统初始化包括参数载入和摄像机初始化。

1) 参数载入

参数载入包括摄像机标定参数的载入和标定误差补偿参数的载入。

2) 摄像机初始化

摄像机初始化包括设置像机的触发模式、设置触发源、设置像机增益和设置曝光时间等。

4.4.2 参数信息输入模块

该模块是针对测量的钢坯对其基本信息进行输入，以便后续的测量，在生产过程中测量钢坯的型号变化后，也是通过此模块对相应参数信息进行修改。输入的基本信息包括规格代码、生产规格、椭圆度和生产公差等。

4.4.3 获取钢坯图像

对钢坯的测量的首要任务是获取钢坯的图像，所以这是整个系统的根本和重要模块，它关系到后续的处理的好坏。

钢坯图像的获取包括两个目的：钢坯轮廓的测量和钢坯表面裂纹的检测。在获取用于钢坯轮廓测量的图像时，打开激光器利用三个摄像机分别获取不同视角的钢坯表面激光光带图像；在获取用于表面裂纹检测的图像时，关闭激光器利用三个摄像机获取钢坯的原始灰度图像。

4.4.4 钢坯轮廓测量

钢坯的轮廓测量，主要实现单像素轮廓的提取和轮廓参数信息的计算。包括圆钢和六角钢的轮廓测量，分别通过不同算法实现。

1) 圆钢轮廓测量

圆钢的轮廓测量之前通过“参数信息输入模块”选择钢坯规格为 Φ ，生产规格选择相应的直径尺寸（ mm ），以及选择对应的椭圆度和生产公差。

2) 六角钢轮廓测量

六角钢的轮廓测量之前通过“参数信息输入模块”选择钢坯规格为 H ，生产规格选择相应的直径尺寸（ mm ），以及选择对应的生产公差。

4.4.5 表面裂纹检测

表面裂纹检测的实现算法同时适用于圆钢与六角钢，分别对三个摄像机所捕获的图像进行处理判断是否存在裂纹缺陷。

4.4.6 数据的存储与查看

为了实现钢坯轮廓参数信息和裂纹特征信息的长期保存与查看设计了此模块，包括数据的导入和数据的查看。

1) 数据的导入

数据的导入包括钢坯轮廓参数信息的导入和表面裂纹特征信息的导入。轮廓参数信息由贵钢具体提供，裂纹特征参数包括裂纹来源、长度和宽度等信息。

2) 数据的查看

为了方便对数据库中的数据进行直观的查看，针对数据查看开发了相应的数据库查看界面，能够直观的对轮廓参数数据和裂纹特征参数数据进行查看，而且开发了筛选数据和查看对应裂纹图像的功能。

4.4.7 轮廓参数的波形显示

为了能直观有效地对钢坯的轮廓参数的波动情况进行观察，开发了钢坯轮廓参数波形图监测界面。它能够实时显示不同型号被测钢坯的轮廓参数波形图，生产工人根据参数波动情况，对生产线就进行及时调整。

4.4.8 异常情况的处理

系统运行过程中出现的异常情况包括摄像机温度过高、轮廓参数超标和检测出表面裂纹。

1) 摄像机温度过高

由于测量系统处于高温环境下，虽然摄像机利用冷水循环进行降温，但防止意外情况的发生，需要实时对摄像机的温度进行监测，防止温度过高，造成摄像

机损坏。

2) 轮廓参数超标

钢坯轮廓测量过程中，会出现因轧制问题出现钢坯参数超标的情况，参数超标意味着钢坯质量出现问题，需要及时报警，及时处理免受损失。

2) 发现表面裂纹

表面裂纹检测过程中，会检测出带有裂纹的钢坯，裂纹缺陷也意味着钢坯质量出现问题，也需要及时报警通知工人，及时处理免受损失。

4.5 数据库的设计

鉴于本测量系统是单一系统，没有并发访问的要求，并不需要太高性能的数据库，选择微软公司的 SQL Server 2000 数据库进行开发，它足以满足系统的要求。

本系统中的数据库开发是基于 ADO（ActiveX Data Objects）接口对数据库进行访问，ADO 是微软开发的数据库访问技术，其对 OLEDB 进行了封装，大大的减少了开发难度，提高了编程效率，它主要有三大对象，分别为：Connection 对象、Command 对象和 Recordset 对象。Connection 对象，表示一个与 OLEDB 数据源的连接，以后的数据库操作都是建立在这个连接之上；Command 对象，直接用来操作 OLEDB 数据源，执行 SQL 查询，存储或其他操作；Recordset 对象，表示从 OLEDB 数据源中提取的记录集，利用 Recordset 对象能方便地实现记录的查询、添加、修改和删除操作。在实际使用中，一般通过三个对象的对应接口（智能指针）来对数据库进行操作，Connection 对象、Command 对象和 Recordset 对象分别对应 _ConnectionPtr 接口、_CommandPtr 接口和 _RecordsetPtr 接口。

SQL Server 2000 数据库中，本软件系统关联数据库名称为“钢坯信息报表”。数据库“钢坯信息报表”中包含 2 张表，分别为“轮廓信息”和“裂纹信息”，表的设计如下，分别如表 4-1 和 4-2 所示。

表 4-1 “轮廓信息”表的结构

字段名	数据类型	长度 (Byte)	描述
时间	datetime	8	测量时间
参数 A	float	4	轮廓参数 A
参数 B	float	4	轮廓参数 B
参数 C	float	4	轮廓参数 C
参数 D	float	4	轮廓参数 D

表 4-2 “裂纹信息”表的结构

字段名	数据类型	长度 (Byte)	描述
时间	datetime	8	测量时间
编号	int	4	系统编号
裂纹来源	varchar	50	捕获有裂纹图像的像机
长度	float	4	裂纹的长度
宽度	float	4	裂纹的宽度

4.6 本章小结

本章对软件系统的设计做出了讲述。首先提出了设计原则，介绍了本系统的框架设计系统，从系统整体设计出发介绍了整体功能设计和软件系统流程图。然后对系统各功能模块进行了详细的功能设计，最后对所用到的数据库部分进行了设计。

第五章 软件系统实现

上一章对软件系统的系统框架和整体设计进行了讲述，了解了软件系统的基本流程，对系统功能模块进行了详细设计，其中系统框架设计中讲述了本软件系统所使用的类、每个类所实现的基本功能和类与类之间的联系，本章将在此基础上重点围绕系统的各项功能进行展开，对每个类实现的具体功能以及类与类之间的信息传递进行分析，对相关算法进行研究，通过编程来实现各功能。

5.1 欢迎界面及主界面的实现

启动软件系统，出现欢迎界面，如图 5-1 所示，设定暂定时间为 3 秒，以便完成对标定参数与误差补偿参数的读取、摄像机与激光器的初始化等工作。欢迎界面是通过启动窗口画面类 CSplashWnd 进行实现的，基本过程如下：

1) 在 CMainFrame 类 OnCreate()函数中在创建主窗口之前调用相关函数：

CSplashWnd::ShowSplashScreen(this);// 启动启动界面的调用

2) CSplashWnd 类中 ShowSplashScreen()函数代码实现如下：

```
void CSplashWnd::ShowSplashScreen(CWnd* pParentWnd /*!= NULL*/)
{
```

```
    c_pSplashWnd = new CSplashWnd;
    if (!c_pSplashWnd->Create(pParentWnd))
        delete c_pSplashWnd;
    else
        c_pSplashWnd->UpdateWindow();
}
```

3) 此画面暂停 3 秒钟，然后隐藏：

此功能通过设置定时器，在对应的相应函数中实现，代码如下：

```
SetTimer(1, ID_TIME_STOP, NULL); //设置定时器,时间为 ID_TIME_STOP
```

```
void CSplashWnd::OnTimer(UINT nIDEvent) //定时器相应函数
```

```
{
    // Destroy the splash screen window.
    HideSplashScreen();
}
```



图 5-1 软件系统的欢迎界面

主界面如图 5-2 所示，主要包括六个窗口部分。最上面用于显示软件系统的名称与钢坯当前型号等信息；往下分左右两部分，分别用于显示钢坯的轮廓图像和检测出带裂纹的钢坯图像；再往下也是左右两部分，其中左边为主要的系统控制与状态显示部分，主要功能是选择钢坯的类型、实时监测摄像机的温度、当前测量系统的帧频和启动测量程序；右边为实时显示钢坯轮廓参数信息和统计软件系统运行时间内的裂纹信息；最下方是输入与监测信息模块，包括钢坯基本信息的输入、钢坯轮廓参数信息波形图的显示、调用数据库查看钢坯轮廓与裂纹的信息、和监测轮廓参数尺寸是否超标以及是否发现裂纹。

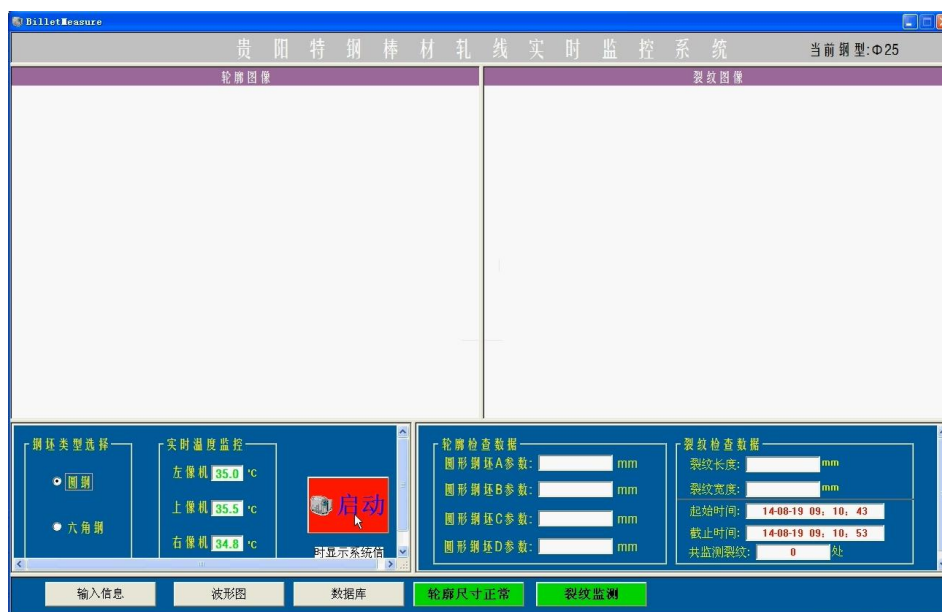


图 5-2 软件系统的主界面

主界面布局的实现是通过对客户区窗口进行分割实现的，运用 CSplitterWndEx 类进行分割。下面讲述详细步骤：

- 1) 首先在 CMainFrame 类的头文件中声明三个 CSplitterWndEx 类对象：

```
CSplitterWndEx m_wndSplitter1;
```

```
CSplitterWndEx m_wndSplitter2;
```

```
CSplitterWndEx m_wndSplitter3;
```

2) 在 CMainFrame 类的 OnCreateClient 函数中实现, 代码如下:

```
BOOL CMainFrame::OnCreateClient(LPCREATESTRUCT lpcs,
```

```
CCreateContext* pContext)
```

```
{
```

```
    CRect rect;
```

```
    GetClientRect(&rect);
```

```
    //第一次分割
```

```
    m_wndSplitter1.CreateStatic(this,4,1);
```

```
    m_wndSplitter1.CreateView(0,0,RUNTIME_CLASS(CBilletMeasureView),  
        CSize(1280,45),pContext);
```

```
    m_wndSplitter1.CreateView(3,0,RUNTIME_CLASS(CToolBarView),
```

```
CSize(1280,45),pContext);
```

```
    //第二次分割
```

```
    m_wndSplitter2.CreateStatic(&m_wndSplitter1,1,2,WS_CHILD|WS_VISIBL  
E,m_wndSplitter1.IdFromRowCol(1,0));
```

```
    m_wndSplitter2.CreateView(0,0,RUNTIME_CLASS(CMergeView),CSize(640  
,480),pContext);
```

```
    m_wndSplitter2.CreateView(0,1,RUNTIME_CLASS(CCrackView),CSize(640  
,480),pContext);
```

```
    // 第三次分割
```

```
    m_wndSplitter3.CreateStatic(&m_wndSplitter1,1,2,WS_CHILD|WS_VISIBL  
E,m_wndSplitter1.IdFromRowCol(2,0));
```

```
    m_wndSplitter3.CreateView(0,1,RUNTIME_CLASS(CDataView),CSize(740,r  
ect.Height()-480-90),pContext);
```

```
    m_wndSplitter3.CreateView(0,0,RUNTIME_CLASS(CControlView),CSize(re  
ct.Width()-740,rect.Height()-480-90),pContext);
```

```
    m_wndSplitter3.RecalcLayout();
```

```
}
```

上述代码实现窗口的分割, 在如图 5-2 的主界面中, 从上到下, 从左到右, 每个窗口次代表通过如下类实现的: CBilletMeasureView 类、CMergeView 类、

CCrackView 类、CControlView 类、CDataView 类和 CToolBarView 类。前五个类的基本功能在 4.2 节中已做介绍，CToolBarView 类的功能用于实现其他的一些功能，如测量钢坯参数信息的修改、轮廓参数必须显示、数据的查看，监测钢坯轮廓参数是否超标和是否发现裂纹等。

5.2 系统初试化模块的实现

系统初始化是在欢迎界面停留时间内完成，初始化工作在 CBilletMeasureDoc 类的构造函数 CBilletMeasureDoc() 内完成，包括像机初始化、计算机并口初始化、读取标定参数和误差补偿参数等，代码如下：

```
//对相机指针进行赋值操作
if (!m_pImageL->InitDeviceL() || !m_pImageR->InitDeviceR() ||
    !m_pImageUp->InitDeviceUp())
    return;
InitBitmap();
// 并口程序初始化操作
::InitializeWinIo()
// 读取处理参数
ReadCalipara("左像机标定参数.bin")
ReadCalipara("右像机标定参数.bin")
ReadCalipara("上像机标定参数.bin")
ReadOffsetParam() //读取标定误差补偿参数
```

像机初始化过程中，需要对摄像机进行设置，包括增益和曝光时间等，三个像机操作一致，以左像机为例说明。上述初始化程序代码中 m_pImageL 是 CDCamDemo 类的一个实例化对象，代表左像机，在调用 InitDeviceL() 函数进行初始化时，其内部会调用 OpenMonoCamera() 函数，其内部首先会调用厂商提供的 SDK 中 VwGigE 类中的方法 OpenCamera() 函数用于打开摄像机，并且返回 VwCamera 类的一个实例对象 m_pMonoCamera，此对象用于调用 VwCamera 类中的函数实现对像机的增益、曝光时间和触发方式进行设置，VwCamera 类也是厂商提供的 SDK 中的一个封装类。

设置触发方式为外部触发，触发源为方波信号且为上升沿触发，设置脉冲宽度为 70 毫秒，其在 CDCamDemo 类的成员函数 OpenMonoCamera() 中实现：

```
bool CDCamDemo::OpenMonoCamera(UINT Index);
```

其中参数 Index 用 0、1 和 2 分别代表左、右和上摄像机。

5.3 参数信息输入模块的实现

此模块完成系统测量前钢坯参数信息的输入，包括规格代码、生产规格、椭圆度和生产公差等，是通过对话框类 CInfoDlg 实现，输入界面如图 5-3 所示，步骤如下：

1) 在 CBilletMeasureDoc 类的头文件中定义 CInfoDlg 类对象：

```
CInfoDlg m_InfoDlg; // 输入信息对话框
```

2) 在 CBilletMeasureApp 类的成员函数 InitInstance() 中进行调用，代码如下：

```
// 输入基本信息对话框显示
```

```
CBilletMeasureDoc* m_pDoc = (CBilletMeasureDoc*)(((CMainFrame*)
    m_pMainWnd)->GetActiveDocument());
if (m_pDoc->m_InfoDlg.DoModal() == IDOK)
{
    m_pDoc->UpdataCircleInfo();
    m_pDoc->DrawSteelStyle();
}
```



图 5-3 基本信息输入对话框

上述对话框实现了系统初次运行的基本参数设置功能，在系统运行过程中，当测量的钢坯型号发生变化时，也可以通过点击主界面左下方的“输入信息”按钮再次弹出此对话框进行参数信息的修改。

5.4 获取钢坯图像的实现

像机在出厂时厂商会为其附带驱动包，像机软件驱动安装之后可通过自带软件对像机进行基本的操作，在启动软件系统之前通常会通过其观察像机的基本状态，像机自带软件启动后的界面如图 5-4 所示。界面上会列出像机的基本信息，包括每个像机的唯一标示名称和所占用的网络接口名称等信息，要注意像机的顺序不可改变。另外，通过合适的参数设置，可以清晰地观察被测钢坯的实时图像画

面，如图 5-5 所示。

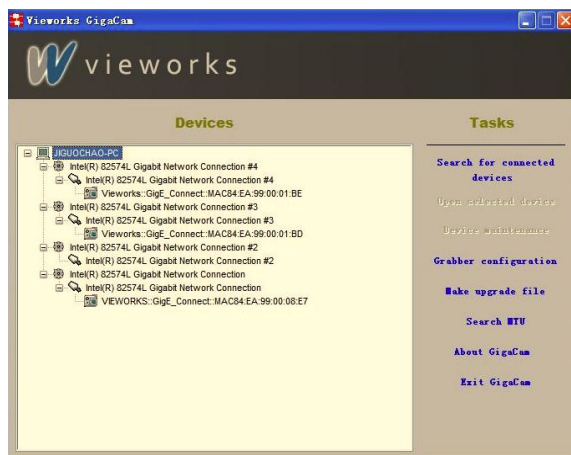


图 5-4 像机自带软启动后界面

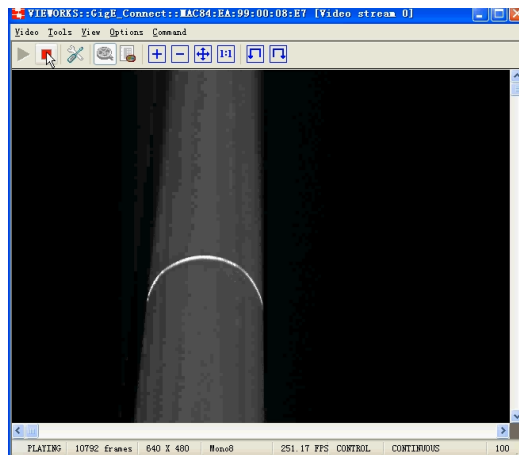


图 5-5 像机自带软件观察钢坯图像

不管是对钢坯轮廓测量还是对其表面裂纹检测，都需要摄像机捕获到钢坯的图像，然而，轮廓测量需要线激光器提供线结构光作为光源，同时还需要对三个摄像机所捕获的三幅图像进行图像融合，这就要保证所捕获的钢坯图像是同一时间点的，也就是涉及到摄像机的同步问题；然而对钢坯的表面裂纹进行检测时，需要将激光器关闭，所以也涉及到激光器的控制问题。本节重点介绍通过与激光器的结合，实现对钢坯图像的获取。

摄像机捕获钢坯图像的基本流程，如图 5-6 所示：

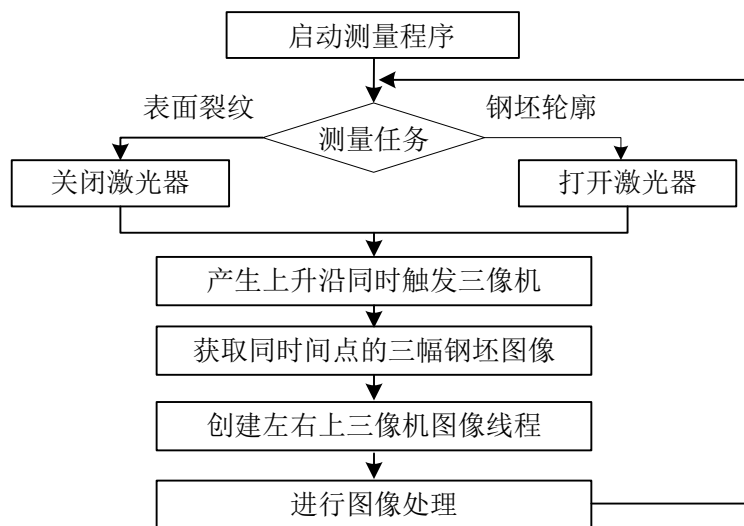


图 5-6 三像机获取钢坯图像流程图

软件系统中测量程序根据测量任务的不同摄像机捕获图像的方式也会不同，系统会自动识别当前测量任务。测量任务是表面裂纹检测时，需要关闭线激光器，

激光器通过计算机的并口进行控制，关闭激光器就是将控制激光器的端口设置为低电平，通过 CBilletMeasureDoc 类中的 CloseLaser() 函数实现，函数如下：

```
void CBilletMeasureDoc::CloseLaser();
```

如果测量任务是钢坯轮廓测量时，需要打开激光器作为光源，相应的打开激光器就是将控制激光器的端口设置为高电平，通过 CBilletMeasureDoc 类中的 OpenLaser() 函数实现，函数如下：

```
void CBilletMeasureDoc::OpenLaser();
```

图像获取需要触发三台摄像机进行捕获图像，上一小节中提到设置摄像机的触发方式为外部触发，其目的是为了更好的控制三台摄像机同时触发，获取同一时间点的钢坯图像，减少误差。同样利用计算机并口对三台摄像机的触发进行控制，摄像机的触发方式是通过方波产生上升沿，在 CBilletMeasureDoc 类的成员函数 ThreadWaveSquare() 中实现，函数为：

```
DWORD WINAPI CBilletMeasureDoc::ThreadWaveSquare(LPVOID lpParameter)
```

ThreadWaveSquare 捕获图像功能的实现是在 CBilletMeasureDoc 类的成员函数 captureimage() 中实现，代码如下：

```
m_sum %= 10000;
// 实现计算 5 幅裂纹图像，再计算 1 幅轮廓图像，控制激光器-基本过程
if (m_sum%ID_IMAGE_RATIO == ID_IMAGE_RATIO-2) //轮廓测量
{
    LaserFlag = TRUE;
    OpenLaser();
}
memcpy((void*)m_pBufferL,(void*)(m_pImageL->m_pBufferOpen),_DEFAULT
_WINDOW_Y*_DEFAULT_WINDOW_X);
memcpy((void*)m_pBufferR,(void*)(m_pImageR->m_pBufferOpen),_DEFAULT
_WINDOW_Y*_DEFAULT_WINDOW_X);
memcpy((void*)m_pBufferUp,(void*)(m_pImageUp->m_pBufferOpen),_DEFAU
LT_WINDOW_Y*_DEFAULT_WINDOW_X);
GetNewPicture(); //再次获取一幅新的图像
```

上述代码中，通过 m_sum 的值来自动判断系统任务是进行轮廓测量还是裂纹检测，在满足轮廓测量的条件下，打开激光器进行图像的捕获；m_pBufferL、m_pBufferR 和 m_pBufferUp 三个变量分别存放三个摄像机所捕获的图像数据，用于后期图像处理；函数 GetNewPicture() 实现对像机进行触发再次捕获图像的功能。

5.5 钢坯轮廓测量的实现

在 2.2.2 章节中提到，摄像机标定过程所采用的世界坐标系为以同一个标定板建立起来的，因此对钢坯轮廓图像进行标定还原后可以直接进行图像的叠加便能够得到完整的钢坯轮廓图像；由于圆钢与六角钢的特点不同，下面将采用不同的处理算法进行测量。下面分为三部分介绍钢坯轮廓测量的实现，包括单像素钢坯轮廓图像的获取、轮廓参数的求解和轮廓图像与参数的实时显示，整体测量流程如图 5-7 所示。

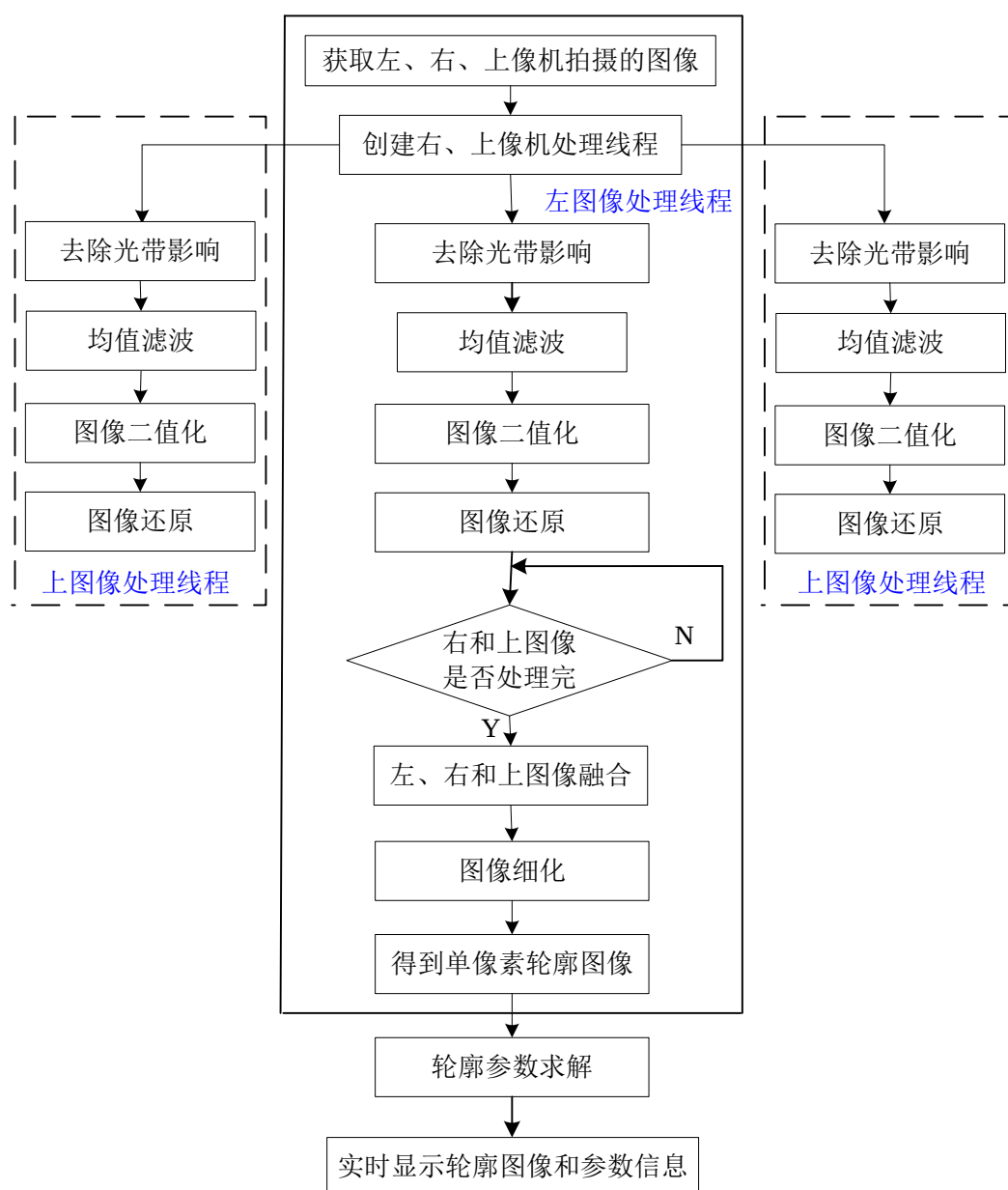


图 5-7 钢坯轮廓测量流程图

5.5.1 单像素轮廓图像的获取

5.5.1.1 算法分析

由于线激光器所发射的线结构光的线性误差以及高温钢坯表面因散射发出红光、反射率和变形不同等因素，造成表面光带的缺损和边界不平滑等缺陷，所以需对所获取的钢坯表面光带图像进行处理^[19]。

上述缺陷会造成二值化不理想以及毛刺和噪点的产生，进而对钢坯轮廓测量与参数获取产生较大影响。本系统中利用均值滤波^[38]技术，不仅可以去掉图像中的噪声，还可以一定程度上补充细节，采用均值的方式达到了平滑边界的目的。

1) 均值滤波

假设 $f(i, j)$ 代表图像中坐标为 (i, j) 的像素值，选定一个大小为 $N \times N$ 的模板 M ，每个模板元素可以设置成不同的加权，对以 (i, j) 为中心， i, j 的范围分别为 $(i - N/2, i + N/2)$ 和 $(j - N/2, j + N/2)$ 的邻近像素点区间记为 R 。均值滤波的过程是， R 内的像素点与模板 M 内对应的模板元素分别相乘得到 $N \times N$ 个值，然后再相加后除以 N^2 所得值作为区间 R 内的像素点的像素值。用数学公式表示坐标为 (i, j) 的像素点均值滤波为：

$$g(i, j) = \frac{\sum_{m=-N/2}^{N/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} f(i+m, j+n)}{N \times N} \quad (5-1)$$

式中，所用模板元素值均为 1，且加权为 1， $g(i, j)$ 为均值滤波后的像素值。本系统中使用 3×3 的模板进行均值滤波，如下所示：

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

分别用型号为 $\phi 22$ 的圆钢和 $H22$ 的六角钢作为实验对象，对其进行均值滤波，并通过灰度直方图对实验结果进行对比，如图 5-8 和图 5-9 所示。

由实验结果原图像的噪点较多经过滤波之后明显改善，反映在灰度直方图中就是那些灰度值较大且数量较少的点变少；同时可以使图像边界变得平滑。特别指出的是，使用的模板阶数越高，滤除噪声的效果越明显，但会使图像变得模糊，不符合实际需求，所以这里选择 3×3 的模板进行滤波。

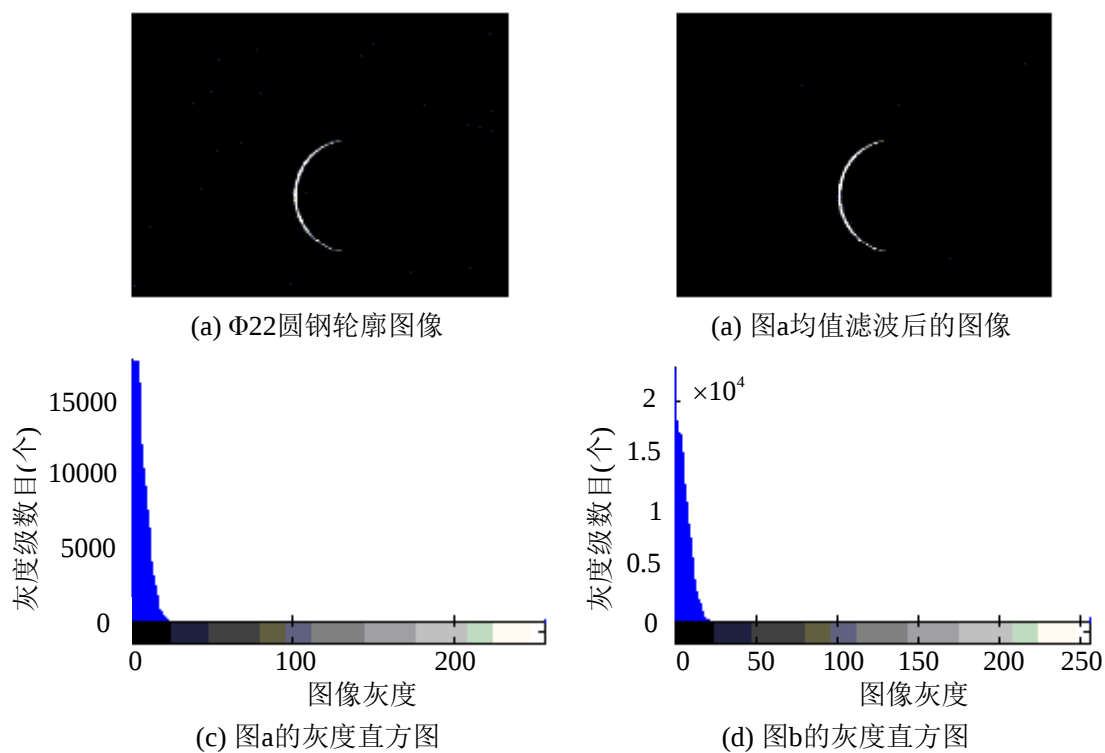


图 5-8 $\Phi 22$ 圆钢均值滤波示意图

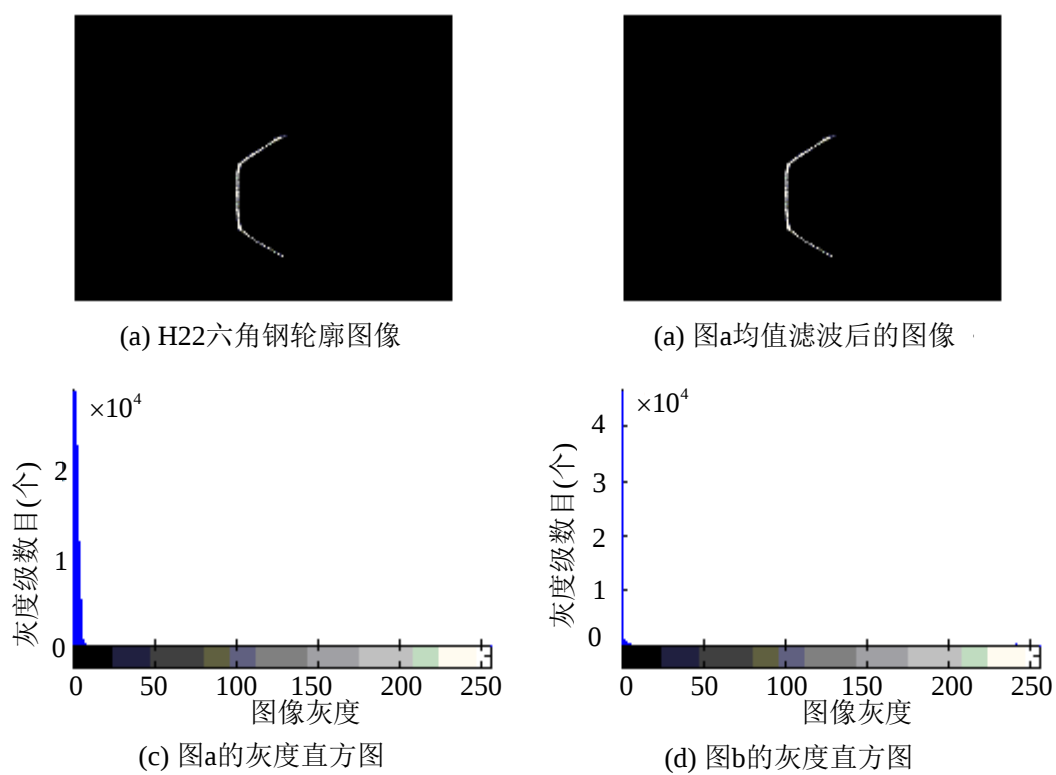


图 5-9 H22 六角钢均值滤波示意图

2) 图像二值化

在进行图像融合之前需要对钢坯图像进行二值化操作，二值化，又称为阈值变换，是常用的图像分割技术^[39-40]。其主要作用是将灰度图像转化为二值黑白图像，基本原理是人为选择某一灰度值作为阈值，小于此阈值的灰度值置为 0，即黑色，其他的置为 255，即白色。基本公式表示如下：

$$f(x, y) = \begin{cases} 0 & f(x, y) \leq T \\ 255 & f(x, y) > T \end{cases} \quad (5-2)$$

其中， $f(x, y)$ 表示坐标为 (x, y) 的灰度值， T 为阈值。

但是，传统的选取固定阈值的方法不适用于本测量系统，因为钢坯具有不同型号与尺寸，且激光器发出线结构光的光强呈高斯分布，另外在轧钢线上钢坯运输过程中会无规则地跳动导致钢坯表面光带处的灰度分布是随时变化，所以固定阈值是不合理的，应采用动态阈值的方法实现二值化。

本系统中利用最大类间方差法（又称大津法，简称为 OTSU），其于 1979 年由日本学者大津提出。它是一种根据图像的灰度特征自动确定阈值，将图像二值化为背景和目标两部分^[41]。

图像 $I(x, y)$ 中，背景和目标两部分分别记为 F 和 B ，两部分的分割阈值假定为 T 。 F 中像素点数所占比例为 ω_0 ，灰度平均值为 μ_0 ； B 中像素点数所占比例为 ω_1 ，灰度平均值为 μ_1 。图像 $I(x, y)$ 的灰度平均值记为 μ ，类间方差记为 g 。

假定图像大小为 $M \times N$ ，灰度值小于 T 的像素点共有为 N_0 个，而大于 T 的像素点共有为 N_1 个，有以下关系式：

$$\omega_0 = \frac{N_0}{M \times N} \quad (5-3)$$

$$\omega_1 = \frac{N_1}{M \times N} \quad (5-4)$$

$$N_0 + N_1 = M \times N \quad (5-5)$$

$$\omega_0 + \omega_1 = 1 \quad (5-6)$$

$$u = \mu_0 \omega_0 + \mu_1 \omega_1 \quad (5-7)$$

$$g = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 \quad (5-8)$$

将公式（5-7）代入公式（5-8）中可得：

$$g = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (5-9)$$

然后采用遍历像素的方法可求得满足 g 最大的阈值 T 。下面是具体求解步骤：

假设图像中灰度分为 L 级 ($0, 1, \dots, L-1$)，灰度值为 i 的像素点共有 $N(i)$ 个，图像中最像素数 $N = N(0) + N(1) + \dots + N(L-1)$ 。灰度值为 i 的概率为：

$$P(i) = N(i) / N \quad (5-10)$$

以阈值 T 为临界点，将图像划分为两类，即亮区和暗区，分别记为 C_1 和 C_2 ，类间方差 σ 有如下表达式：

$$\sigma = a_1 \cdot a_2 (u_1 - u_2)^2 \quad (5-11)$$

其中， a_1 和 a_2 分别为 C_1 和 C_2 的面积所占图像总面积的比例，有

$$a_1 = \sum_{i=0}^T P(i), \quad a_2 = 1 - a_1 \quad (5-12)$$

u_1 为类 C_1 的均值， u_2 为类 C_2 的均值，即：

$$\begin{cases} u_1 = \sum_{i=0}^T [i \cdot P(i)] / a_1 \\ u_2 = \sum_{i=T+1}^{L-1} [i \cdot P(i)] / a_2 \end{cases} \quad (5-13)$$

该算法中求得阈值 T ，使类间方差 σ 为最大值，即：

$$\sigma_b = \max(a_1(T) \cdot a_2(T) \cdot \Delta u^2) \quad (5-14)$$

其中， $\Delta u = u_1 - u_2$ 。以 T 为阈值对钢坯图像进行二值化，对图 5-8 和图 5-9 中滤波后的图像 (b) 采用以上方法进行二值化结果如图 5-10 所示。

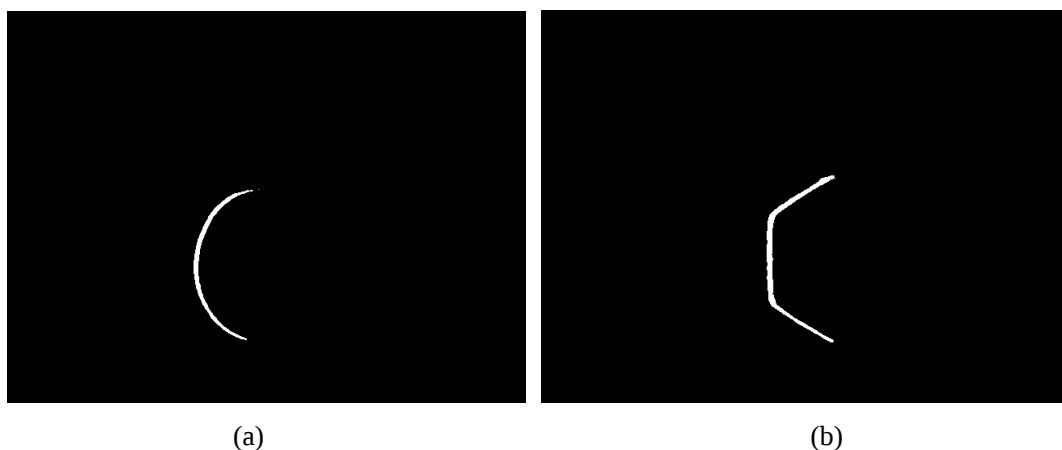


图 5-10 钢坯光带轮廓图像二值化效果图

(a) $\Phi 22$ 圆钢二值化后的轮廓图像；(b) $H22$ 六角钢二值化后的轮廓图像

3) 图像细化

经过上述步骤的处理，得到二值化后的钢坯光带图像，但直接对轮廓进行提取和尺寸的测量还不太可能，因为现在的轮廓图像具有较宽的光带，无法确定准确的轮廓边界。基本的处理算法是对二值化的轮廓光带图像进行单像素提取确定边界，然后计算轮廓参数，许多学者都有诸多研究。但对于基于线结构光的机器视觉测量系统而言，思路基本上都是通过提取光带的中心作为单像素轮廓。

所谓的单像素提取，也就是细化处理的过程，基本的细化处理方法分为串行细化^[42-43]、并行细化^[44-47]以及混合细化^[48]。串行细化过程中处理像素的顺序不同，结果也会不同，虽然其在删除边缘点方面快速彻底，所用时间短，但是常常出现非对称的结构；而并行细化是通过相同的匹配条件来处理一幅图像，具有各向同性的特点，由于其使用先校验后删除的处理方式，避免出现非对称的结构，但所需时间较长，线条宽度的细化不彻底。总体上并行细化好于串行细化，中心的提取方面相对稳定。混合细化是在考虑两种算法优缺点提出的，基本思路是先进行并行细化，后再采取串行细化，混合算法虽能得到较理想的细化结果，但耗时长。

并行细化中细化不完全的问题主要在对交叉和大曲率交点处细化时表现明显。然而被测量的圆形钢坯和六角形钢坯的曲率半径都较小，另外激光器选择窄线宽激光器，保证线结构光在钢坯表面的均匀变化，使细化算法更加稳定。本测量系统中，采用 Zhang 并行细化算法^[49]对钢坯的光带图像进行中心提取。

Zhang 并行细化算法，是美国学者 Zhang 于 1984 年提出，其具有细化速度快、细化后保持原有的连通性和无毛刺等优点^[50-51]。基本原理是，定义一个 3×3 的模板，如图 5-11 所示，选取模板中心点元素（ $P1$ ）作为目标像素点，即前景点，在其 8 邻域内根据特定条件来决定是否将 $P1$ 删除，即令 $P1=0$ 。下面分两步介绍此算法的实现思路：

P3	P2	P9
P4	P1	P8
P5	P6	P7

图 5-11 3×3 邻域模板

第一步，假定图像中某一个 3×3 的区域，如图 5-11 所示，依次标记为 $P1$ ， $P2$ ， $\dots$ ， $P9$ 。规定前景色用 1 表示，背景色用 0 表示，那么如果中心像素点 $P1=1$ ，且同时满足一下 4 个条件，就删除之：

$$(1) \quad 2 \leq NZ(P1) \leq 6$$

$$(2) \quad Z0(P1)=1$$

$$(3) \quad P2 * P8 * P6 = 0$$

$$(4) \quad P4 * P8 * P6 = 0$$

其中, $NZ(P1)$ 是 $P1$ 点 8 领域中 1 的个数; 而 $ZQ(P1)$ 表示以 $P2, P3, \dots, P9$ 为序, 满足从 0 到 1 变化的次数。每次判断出满足条件的点时, 暂时不删除, 但要记录这些点的位置坐标, 等遍历完整幅图像后再进行删除。

第二步, 与第一步类似, 满足如下条件再次进行删除:

$$(1) \quad 2 \leq NZ(P1) \leq 6$$

$$(2) \quad Z0(P1)=1$$

$$(3) \quad P2 * P4 * P6 = 0$$

$$(4) \quad P2 * P4 * P8 = 0$$

同样, 先记录满足条件的点的位置坐标, 等遍历完整幅图像在进行删除。

对一幅图像不断执行上述两步处理, 直到没有再满足删除条件的目标点为止, 剩余的像素点即为提取出的光带中心元素, 形成了钢坯单像素轮廓。对图 5-10 中的二值化图像进行细化处理, 如图 5-12 所示。

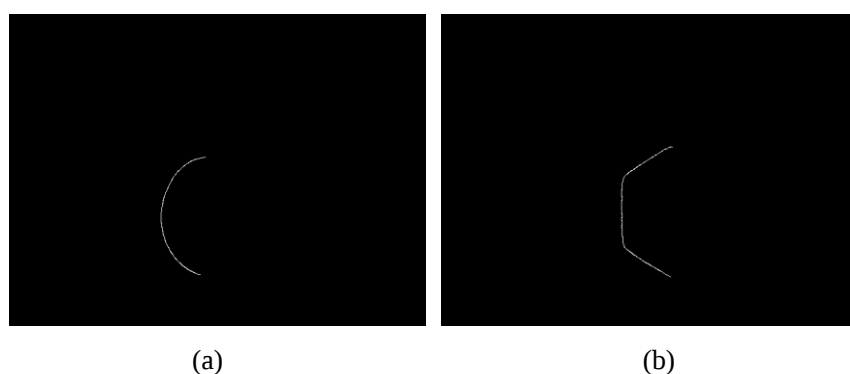


图 5-12 钢坯轮廓图像细化算法处理效果图

(a) $\Phi 22$ 圆钢二值化光带轮廓细化示意图; (b) $H22$ 六角钢二值化光带轮廓细化示意图

5.5.1.2 软件实现

单像素钢坯轮廓图像的获取部分, 圆钢与六角钢实现步骤一样, 下面介绍圆钢的实现过程。

1) 点击“启动”按钮开始测量任务, 其响应函数是 `CControlView` 类的成员函数 `OnButtonStart()`, 判断测量钢坯为圆钢还是六角钢, 之后创建左图像处理线程, 代码如下:

```
HANDLE m_handleCI=CreateThread( NULL, NULL,CBilletMeasureDoc::
    ImageCircleProcL, m_pDoc, CREATE_SUSPENDED, NULL);
```

上述代码中 ImageCircleProcL() 函数即为创建的左图像处理线程，位于 CBilletMeasureDoc 类中为静态成员函数。

2) 在 ImageCircleProcL() 函数中调用 CBilletMeasureDoc 的类成员函数 ImageProcessCircleL(), 代码如下:

```
m_pDoc->ImageProcessCircleL(); //图像算法步骤
```

3) 在 ImageProcessCircleL() 函数中创建右图像处理线程和上图像处理线程:

```
HANDLE CircleProcR = CreateThread(NULL, NULL, CBilletMeasureDoc::
    ImageCircleProcR, this,NULL,NULL);// 创建右相机图像处理线程
HANDLE CircleProcUp = CreateThread(NULL, NULL, CBilletMeasureDoc::
    ImageCircleProcUp,this,NULL,NULL);// 创建上相机图像处理线程
```

上述代码中 ImageCircleProcR() 和 ImageCircleProcUp() 函数分别为右图像处理线程和上图像处理线程，然后再分别调用 ImageProcessCircleR() 和 ImageProcessCircleUp() 函数，这样就形成了三个处理函数同时并发执行，分别为: ImageProcessCircleL()、ImageProcessCircleR() 和 ImageProcessCircleUp() 函数。

4) 其中三个函数处理过程一致，分别对三幅图像进行预处理，依次为去除光带影响、均值滤波、图像二值化和图像还原，上图像处理线程为例，代码如下:

```
EliminateStrip(m_pDataUp);// 去除光带影响
// 图像均值滤波，平滑边界
ImageMedieFuse(m_pDataF);
// 图像二值化
ImageBinaryUp(m_pDataUp);
// 图像还原
m_pDataUpReduct = ReductImageUp(m_pDataUp);
```

5) 左图像处理线程在进行完上述处理后，等待右和上图像处理线程的结束，对三幅图像进行图像融合处理，然后进行图像细化得到单像素轮廓图像，代码如下:

```
// 图像融合
m_pDataF=ImageFuse(m_pDataLReduct,m_pDataRReduct,m_pDataUpReduct);
// 图像细化
ImageMiddleFuse(m_pDataF);
```

上述代码中 m_pDataF 保存的便是最终单像素轮廓图像的数据信息。

5.5.2 轮廓参数的求解

轮廓参数求解流程如图 5-13 所示，可以看出参数求解的实现过程涉及到 CBilletMeasureDoc 类和 CDataView 类，且圆钢与六角钢的实现方法不同。

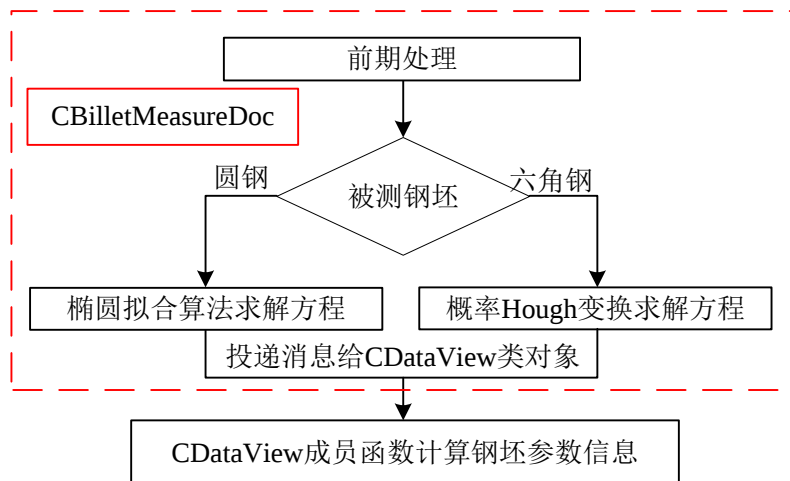


图 5-13 轮廓参数求解流程图

5.5.2.1 圆钢的轮廓参数求解

在圆钢轧制过程中，一般采用双半径椭圆孔型的设计，这样的好处是可以确保成品钢的椭圆度^[52]。所以最终从轧钢生产线上生产出的圆钢是呈现椭圆型的，根据这一特点，本系统中在进行圆钢的轮廓参数测量时采取了椭圆拟合算法。

1) 算法分析

椭圆拟合算法的基本思路就是找到一个椭圆使得钢坯轮廓的点基本都在这个椭圆上，即利用一个椭圆方程来描述钢坯轮廓，此椭圆的中心就是钢坯轮廓的圆心。其衡量标准就是通过适量的样本点求得满足均方差最小的椭圆方程。

表 5-1 三种椭圆拟合方法的优缺点比较

椭圆拟合算法	优点	缺点
霍夫变换	算法稳定性好，不易受噪点影响	在空间和时间的复杂度上最大
最小平方中值法	鲁棒性强，是一种稳健的算法	对拟合的结果缺少很好的数学估计，需人工评判
最小二乘法	空间和时间复杂度最小	容易受到孤立点影响，鲁棒性比较差

椭圆拟合算法最常用的有霍夫变换（Hough Transform）、最小平方中值法（LMeds）和最小二乘法（DLS）^[53-55]。霍夫变换的基本思路是，通过图像平面和参数平面之间的对偶关系，将图像空间中的轮廓边界问题转换到参数平面，求

得绝大多数边界点满足参数空间方程所对应的参数作为结果；最小平方中值法是由 Gerhard Roth 和 Martin D. Levine 提出的，它的基本思路是，通过最小平方中值不易受孤立点影响的思想进行拟合算法的设计；最小二乘法的基本思路是，假设椭圆参数，得到所有待拟合点到椭圆的误差距离的平方和，再求出使这一平方和最小的椭圆参数^[56]。三种椭圆拟合方法的优缺点比较如表 5-1 所示。

本系统对圆钢轮廓进行测量时，由于在高温环境下，且使用光强很高的线结构光，所以背景过滤很干净，且通过图像的预处理使得大部分孤立点和噪点得到了很好的滤除。因此本系统中选用时间和空间复杂度都最小的最小二乘法^[57]进行椭圆拟合。

最小二乘法拟合算法中，误差距离一般分为代数距离和几何距离，代数距离一般用于直接最小二乘法拟合算法^[58]，本系统基于代数距离进行椭圆拟合，一般椭圆表达式表示如下：

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (5-15)$$

将常数项 f 归一化：

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0 \quad (5-16)$$

最小二乘法中，上式对应的目标函数为：

$$F(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^m (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + 1)^2 \quad (5-17)$$

由极值原理知，使 $F(A, B, C, D, E)$ 取最小值，那么有：

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \quad (5-18)$$

进一步有：

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^m y_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i^3 \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m y_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m y_i \end{bmatrix} \quad (5-19)$$

利用高斯主元素消去法中的全主元素消去法^[59]求得参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 的值，再利用公式 5-16 将其转换成椭圆标准方程，便可求出相关参数：椭圆中心的坐标值 (x_0, y_0) 、长半轴 a 、短半轴 b 以及长轴的旋转角 θ ，图 5-14 为其示意图。

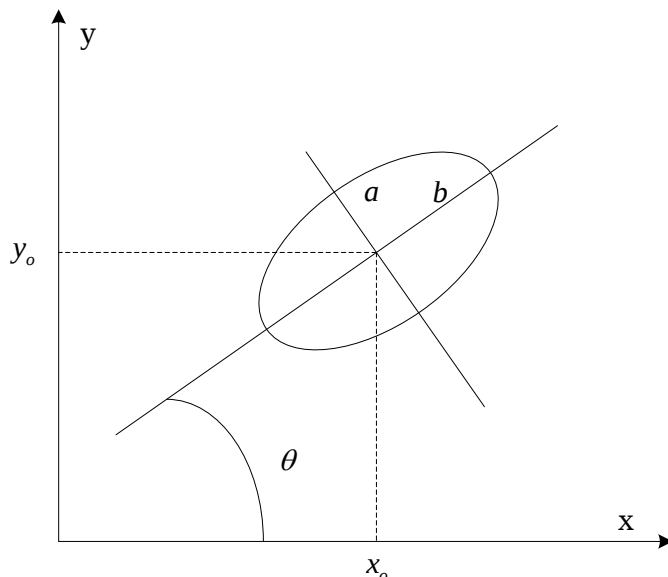


图 5-14 直角坐标参数几何意义

上述两组参数的转换如下：

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \\ a = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \\ b = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - 1)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \\ \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{B}{A - C}\right) \end{cases} \quad (5-20)$$

在公式 5-19 的求解过程中，采取离散形式进行数据点的选取，不是把全部的数据点代入，而是采集轮廓上均匀分布的 30 个像素点作为样本点，代入公式 5-19，再结合公式 5-20 求得椭圆拟合参数。图 5-15 为拟合结果示意图，其中实线坐标轴为长轴所在坐标轴。

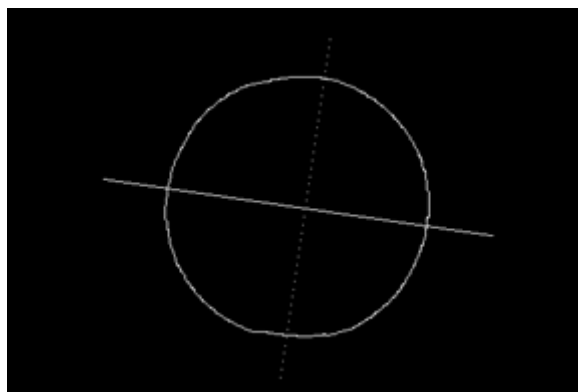


图 5-15 椭圆拟合结果示意图

圆钢的参数信息，主要有四个指标，分别为参数 A、参数 B、参数 C 和参数 D，如图 5-16 所示为圆钢轮廓参数标注图。其中参数 A 为椭圆的长轴长，参数 B 为椭圆的短轴长，参数 C 和参数 D 分别为以长轴为参考轴， $\pm 30^\circ$ 方向上的线段长度。

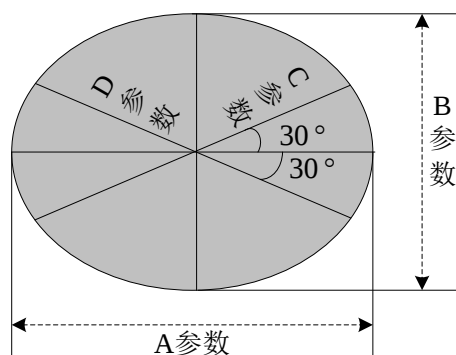


图 5-16 圆钢轮廓参数标注图

圆钢轮廓参数的求解过程，采用直线求交点方法进行求解。基本步骤为：首先根据椭圆拟合结果所求的相关参数，求得参数 A 和 B；然后再利用参数 C 和参数 D 的线段所在直线方程求得与椭圆的交点，进而得到参数 C 与参数 D。

2) 软件实现

参数的求解并不只是在 CBilletMeasureDoc 类中完成的，后期的求解过程是在 CDataView 类中完成，涉及到类与类之间的信息传递，过程如下：

(1) 由图 5-13，CBilletMeasureDoc 类中完成部分，在左图像处理线程函数 ImageProcessCircleL() 中调用，代码如下：

```
// 计算椭圆的中心位置
m_pEllipse = CalculateCircleCenter(m_pDataF);
if (m_pDataF)
```

ShowResultInfo(0); //0 代表圆钢

其中 m_pDataF 保存为单像素轮廓后图像的数据信息, m_pEllipse 为结构体 EllipseParam 的一个对象, 存放了椭圆拟合后的参数信息, 定义如下:

```
struct EllipseParam{
    double m_X;    // 圆心 X 轴坐标
    double m_Y;    // 圆心 Y 轴坐标
    double m_A;    // 长半轴长
    double m_B;    // 短半轴长
    double m_Angle;// 旋转角
    int m_MinX, m_MaxX, m_MinY, m_MaxY; // 表示椭圆区域大小
};
```

(2) ShowResultInfo()完成了向 CDataView 类的消息传递, 代码如下:

```
void CBilletMeasureDoc::ShowResultInfo(int m_Flag)
{
    if (m_Flag == 0) //传递圆形钢坯轮廓消息
        ::PostMessage(m_hDataWnd, IDM_MESSAGE_CIRCLE, NULL, NULL)
    if (m_Flag == 1) // 传递棱形钢坯轮廓信息消息
        ::PostMessage(m_hDataWnd, IDM_MESSAGE_PRISMATIC, NULL, NULL)
}
```

m_hDataWnd 是 CDataView 类的实例对象, IDM_MESSAGE_CIRCLE 为向其传递的消息, 此消息的处理函数为 OnMessageCircle(), 代码如下:

```
LRESULT CDataView::OnMessageCircle(WPARAM wParam, LPARAM lParam)
{
    GetCircleOutlineInfo();
}
```

(3) GetCircleOutlineInfo()函数完成了参数 A、B、C 和 D 的求解。

5.5.2.2 六角钢的轮廓参数求解

上一节讲述了圆型钢坯的参数求解过程, 利用椭圆拟合算法实现。但鉴于六角钢的特殊性, 并没有太多现有的高效算法, 大部分还是根据六角钢基本特征, 利用直线检测的方式进行测量。本测量系统中利用 Hough 变换作为测量算法, 通过 Hough 进行直线检测, 获取六角钢的边长直线, 再利用直线相交点确定六个交点的坐标并保存以便进一步对轮廓参数进行求解。

1) 算法分析

标准 Hough 变换是利用点-线对偶性的基本思想, 即图像空间中共线的点对应参数空间里相交的线, 反之, 参数空间相交于同一点的所有曲线对应图像空间中所有共线的点^[60-63]。标准 Hough 变换的原理如图 5-17 所示。

图像 $x-y$ 坐标中的一条直线方程表示如下:

$$y = ax + b \quad (5-21)$$

极坐标形式为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (5-22)$$

其中, ρ 代表直线到原点的垂直距离, θ 代表直线的垂线与 x 轴的夹角。

公式 (5-22) 说明, 位于图像坐标系的一条直线 (x, y) , 映射到了参数坐标系的一个点 (ρ, θ) ; 同理, 由于图像坐标中过某一点 (x_i, y_i) 的直线有无数条, 那么映射到参数平面便是一条曲线。对于共线的点, 对应地会有多条曲线相交于一点 (ρ_0, θ_0) , 如图 5-17 中 (b) 和 (c) 所示。

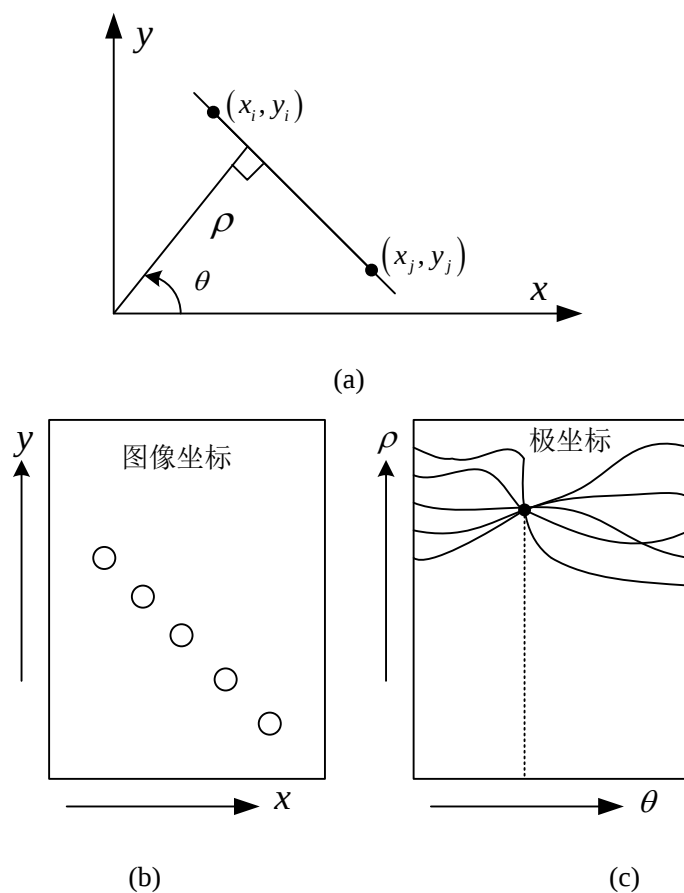


图 5-17 Hough 变换的原理示意图

(a) 直线的极坐标形式; (b) 图像坐标平面; (c) 极坐标平面

上节中讲到，标准 Hough 变换的缺点是时间和空间的复杂度高所以导致算法的实时性差。改进的概率 Hough 变换^[64]是基于标准 Hough 变换进行的改进，具有实时和高效的优点，其算法中的直线检测与映射是交替进行的，具体的实现步骤如下^[65]：

(1) 将参数空间平均分割成多个小区间，且为每个区间建立一个累加器 $A(\rho, \theta)$ ，初始化为零；对图像空间进行检测，将所有检测出的边缘点存放到一个待处理的边缘点集合中，简称为 P ；

(2) 首先查看 P 是否为空，为空则结束算法；否则随机地从 P 中取出一个像素点对偶到对应的参数空间中，并删除之；然后在各 ρ 值下算得 θ 的值，将各 ρ 和 θ 对应的 $A(\rho, \theta)$ 加 1；

(3) 判断每个 $A(\rho, \theta)$ 的值是否有大于设定的阈值 T ，若不满足则继续上一步；

(4) 对于满足大于阈值 T 的某一累加器 $A(\rho_i, \theta_j)$ 中对应的参数 ρ_i 和 θ_j 可以唯一确定直线 $\rho_i = x \cos \theta_j + y \sin \theta_j$ ，同时将集合 P 中位于该直线的所有点删除，对此累加器进行清零，回到第二步继续。

可以看出，算法处理过程中在提取直线同时不断剔除共线的像素点，且只保留直线的两个端点，所以此算法的效率明显提升。

轧钢生产线上，对六角钢进行参数测量时，利用霍夫变换进行直线检测时，会出很多碎线段，且传送过程中六角钢处于高抖动状态，导致每次测量结果会有误差，且非常不稳定，下面结合概率 Hough 变换，根据六角钢的特点介绍本测量系统中的具体实现。

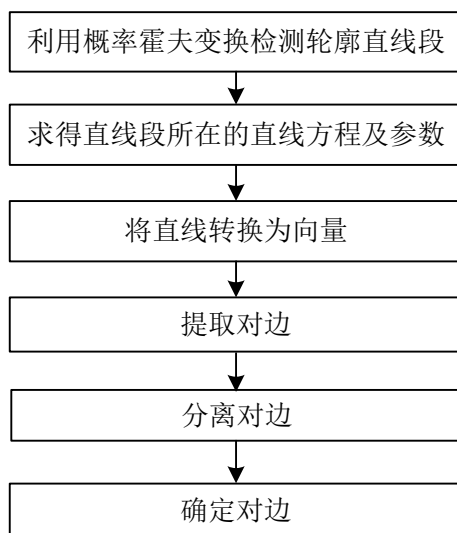


图 5-18 六角钢轮廓参数测量流程图

本测量系统中，六角钢的轮廓参数计算流程如图 5-18 所示，具体步骤如下：

(1) 对图像进行霍夫变换获取六角钢坯的轮廓线段的起点和终点，如图 5-19 所示，用点 (x, y) 存储坐标；然后求出这些线段所在直线的斜率、倾角、对应直线方程的 $y = ax + b$ 参数 b 以及各线段的长度；

(2) 将线段转换为向量，并且修正各向量的角度到 $[0^\circ \sim 180^\circ)$ ，其状态如图 5-20 所示；

(3) 提取对边，对步骤 2 中的向量进行遍历，找出六角钢的平行对边，并保存到三个 **vector** 容器中；

(4) 分离对边，将步骤 3 中保存到 **vector** 容器中的平行对边进行分离，分别放入两个 **vector** 容器中，最终形成六个 **vector** 容器用于保存；

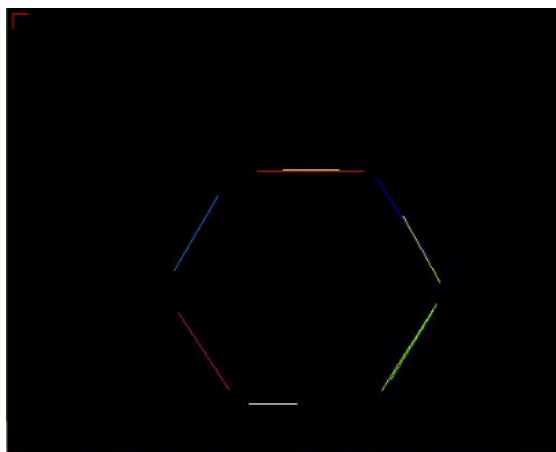


图 5-19 霍夫变换得到六角钢轮廓线段

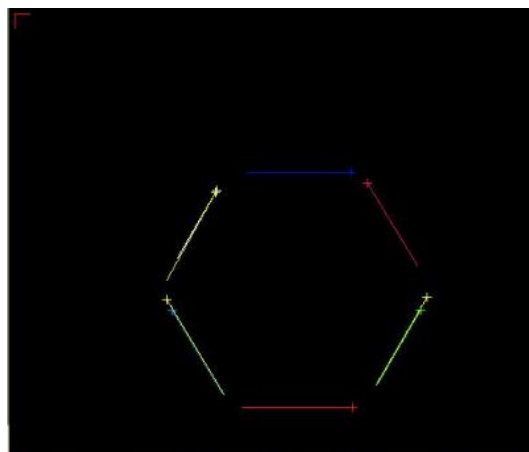


图 5-20 调整向量方向角度范围 $[0^\circ \sim 180^\circ)$

(5) 确定对边，由于霍夫直线检测的缺陷，对每条对边的检测时都会检测到几条直线而非一条，所以在 6 个容器中，每个容器存放的直线并非确定为一条，由于钢坯轮廓参数只需两条对边便可确定，所以进行如下处理：筛选六个容器中每个容器中长度最长的直线段作为六角钢的六条边，如图 5-21 所示；

(6) 计算六角钢轮廓参数（即对边距）。在扎钢生产线上，六角钢传送过程中分直立和水平两种方式，分别如图 5-22 和图 5-23 所示。此时依据垂线方程不同采取不同的计算方法：过六角钢的一条边的中点 A 作垂线，垂线与对边交于点 B，求出点 AB 之间的距离就为六角钢的对边距，用同样的方法求出另外两对边距。

以上就是针对六角型钢坯设计的处理轮廓参数的算法，现场测量结果显示，具有很高的鲁棒性和准确度。

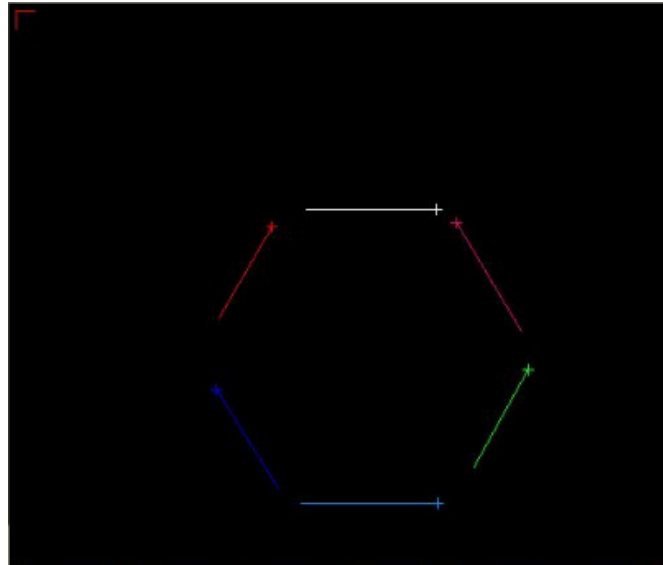


图 5-21 将容器中最长线段作为轮廓的一条边

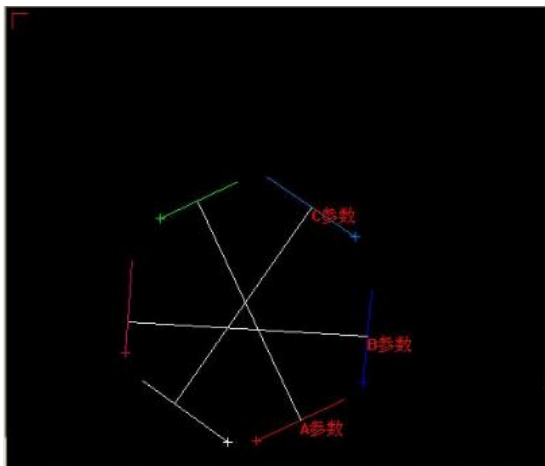


图 5-22 直立六角钢参数示意图

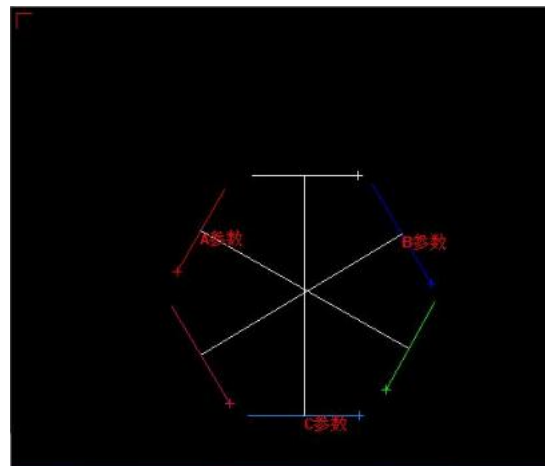


图 5-23 水平六角钢参数示意图

2) 软件实现

此步骤与圆钢轮廓参数求解类似，ImageProcessPrismaticL()为六角钢左图像处理线程，相关函数调用过程如下：

```
m_pLine = GetSideVecter(m_pDataF);//霍夫变换求解参数
```

```
if (m_pDataF)
```

```
    ShowResultInfo( 1 );
```

ShowResultInfo()与圆钢一样，传递消息为 IDM_MESSAGE_PRISMATIC，其在 CDataView()类中消息相应函数为 OnMessagePrismatic()，代码如下：

```
LRESULT CDataView::OnMessagePrismatic(WPARAM wParam, LPARAM lParam){
```

```
    GetPrismaticOutlineInfo();
```

```
return TRUE;
}
```

GetPrismaticOutlineInfo()函数完成了六角钢的参数求解。

5.5.3 轮廓图像与参数的实时显示

1) 圆钢与六角钢分别在 GetCircleOutlineInfo()和 GetPrismaticOutlineInfo()函数中完成，相关代码如下：

(1) 圆钢的图像显示：

// 显示图像

```
::StretchDIBits(m_hdcMerge,0,ID_MOVE_VALUE,_CALIBRATION_WINDOW_X/2,_CALIBRATION_WINDOW_Y/2,0,0,_CALIBRATION_WINDOW_X,_CALIBRATION_WINDOW_Y,m_pBMerge,m_pRgbInfo, DIB_RGB_COLORS, SRCCOPY);
```

(2) 六角钢的图像显示：

```
::StretchDIBits(m_hdcMerge,0,ID_MOVE_VALUE,_CALIBRATION_WINDOW_X/2,_CALIBRATION_WINDOW_Y/2,0,0,_CALIBRATION_WINDOW_X,_CALIBRATION_WINDOW_Y,m_pBMerge,m_pRgbInfo,DIB_RGB_COLORS,SRCCOPY);
```

(3) 轮廓参数显示

圆钢的显示调用如下：

```
ShowCircleInfo(MeasParam *m_OutlineMeas);
```

六角钢的显示调用如下：

```
ShowPrismaticInfo(MeasParam *m_OutlineMeas);
```

点击“启动”按钮，运行测量程序，轮廓图像与参数显示效果如图 5-24 所示。

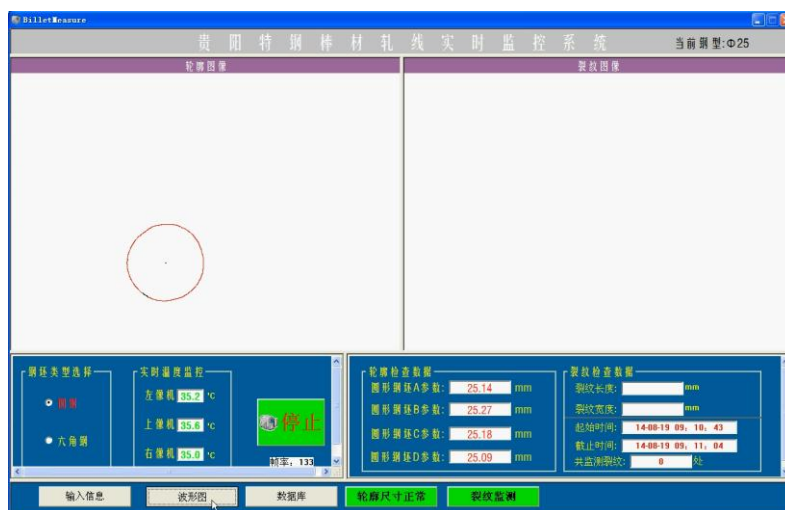


图 5-24 轮廓图像与参数显示效果图

5.6 表面裂纹检测的实现

根据 4.1 章节中所述设计原则中的模块化原则，表面裂纹检测的算法是他人完成，这里不对算法进行分析，只给出软件实现过程，需要指出裂纹检测过程与轮廓测量是互斥进行的，裂纹检测流程图如图 5-25 所示。

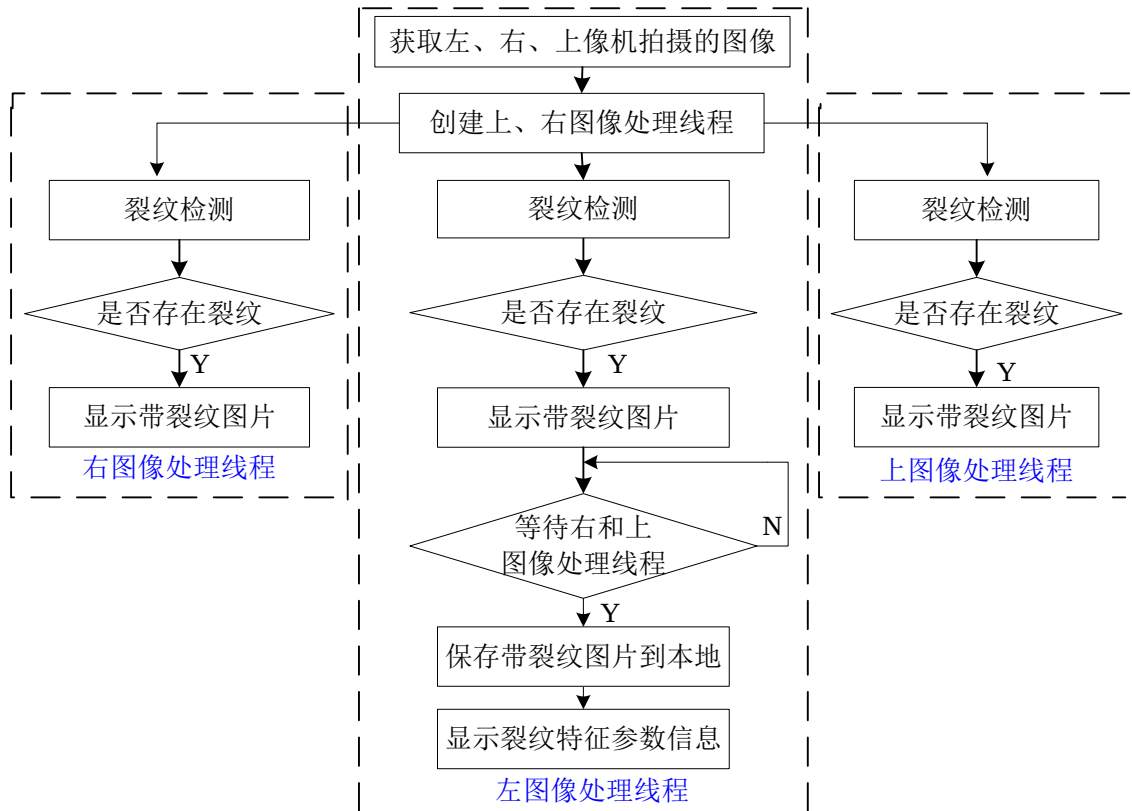


图 5-25 裂纹检测流程图

1) 首先点击“启动”按钮，创建左图像处理线程，代码如下：

```
HANDLE m_HandleCI = CreateThread( NULL, NULL, CBilletMeasureDoc::
ImageCrackProcL,m_pDoc,CREATE_SUSPENDED,NULL);
```

2) 左图像处理线程 ImageCrackProcL()函数调用 ImageProcessCrazeL()处理函数，代码如下：

```
m_pDoc->ImageProcessCrazeL();// 图像算法步骤
```

3) ImageProcessCrazeL()对左像机所获取的图像进行裂纹检测，其中包括创建右、上图像处理线程，过程如下：

```
HANDLE hWnd[2];
```

```
hWnd[0] = CreateThread(NULL,NULL,CBilletMeasureDoc::ImageCrackProcR,
this,NULL,NULL); //创建右图像处理线程
```

```

hWnd[1] = CreateThread(NULL,NULL,CBilletMeasureDoc::ImageCrackProcUp,
                      this,NULL,NULL); //创建上图像处理线程
GetCrackImageL(); //得到无光带图像
// 获取 soble 区域，裂纹提取的准则
CrackRegion* m_pSobleRegion = GetSobleRegion(m_pDataCL);
// 获得锁定区域内的直方图峰峰值
BYTE m_iHistPeak = GetHistPeak(m_pDataCL,m_pSobleRegion);
BYTE* m_pIronExpand = GetIronExpandImage(m_pDataCL,m_pSobleRegion,
                                           m_iHistPeak); // 获得铁销图像
BYTE* m_pSobleImage = GetSobleImage(m_pDataCL,m_pIronExpand,
                                     m_pSobleRegion); // 计算 soble 图像，裂纹检查的重点算法
// 获取裂纹周长
m_iCrackLengthL = GetCrackLengthL(m_pSobleRegion,m_pSobleImage);
if (m_iCrackLengthL > ID_CRACK_LENGTH)
    ShowCrackBmp();// 显示可能存在裂纹的 soble 图像区域
WaitForMultipleObjects(2, hWnd, TRUE, INFINITE); //等待右、上线程结束
SaveCrackImage(BYTE *m_pData); //保存裂纹图片到本地
ShowCrackInfo(int nLength); //显示裂纹特征参数

```

启动测量程序，发现裂纹时的主界面显示效果如图 5-26 所示。

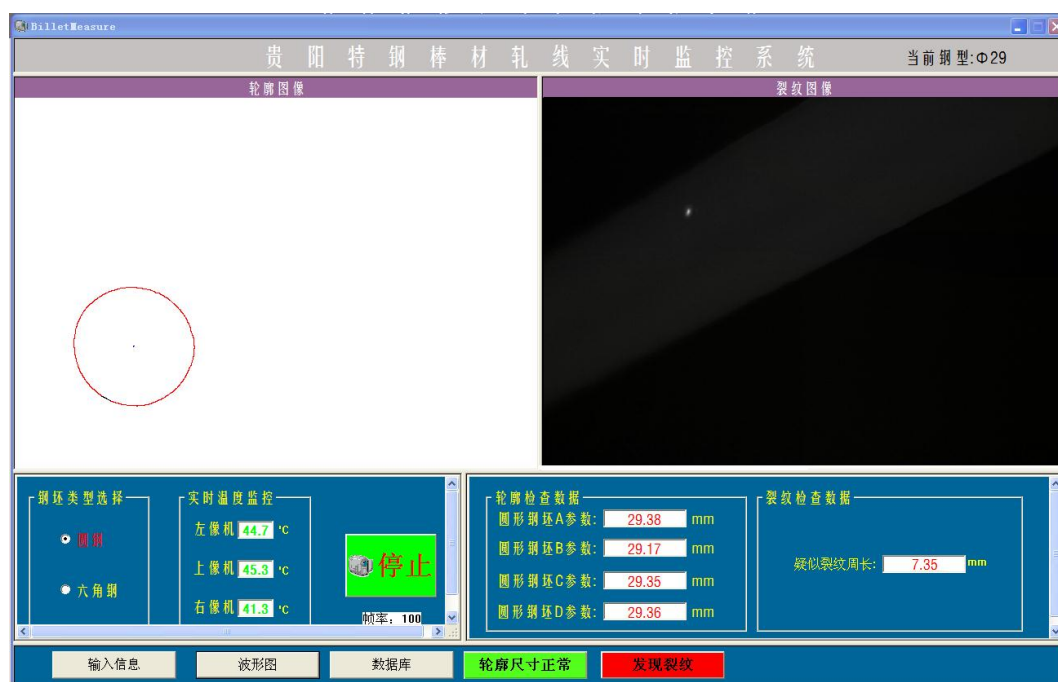


图 5-26 发现裂纹主界面显示效果

5.7 数据的存储与查看

此功能通过数据库实现，本系统中与此功能相关的类是 CDlgAccess，使用到了 _ConnectionPtr 接口和 _RecordsetPtr 接口，下面详细介绍此功能的实现过程：

(1) 首先声明 _ConnectionPtr 和 _RecordsetPtr 接口的对象：

```
_ConnectionPtr m_pConnection; //CbilletMeasureApp 类中声明
_RecordsetPtr m_pRecordset;    //CdlgAccess 类中声明
_RecordsetPtr m_pRecordset1;   //CdlgAccess 类中声明
```

(2) 加载 ADO 库：

```
#import "C:\program files\common files\system\ado\msado15.dll" no_namespace
rename("EOF","adoEOF") //在头文件 stdafx.h 中
```

(3) 初始化 COM 环境：

```
AfxOleInit(); //在 CBilletMeasureApp::InitInstance()函数中
```

(4) 连接数据库：

```
HRESULT hr;
hr = m_pConnection.CreateInstance("ADODB.Connection");// Connection 对象
if(SUCCEEDED(hr))
{
    CString sql = "Provider=SQLOLEDB.1;Password=1234; ""Persist Security
                  Info=True;User ID=贵钢集团; ""Initial Catalog=钢坯信息报表;
                  Data Source=JGC\\SQLDB";
    m_pConnection->ConnectionTimeout = 5;
    m_pConnection->Open(_bstr_t(sql), "", "", adModeUnknown);///连接数据库
}
```

(5) 打开记录集：

```
m_pDoc->m_dlgAccess.m_pRecordset.CreateInstance("ADODB.Recordset");
m_pDoc->m_dlgAccess.m_pRecordset->Open("select * from 轮廓信息 order by
时间", theApp.m_pConnection.GetInterfacePtr(), adOpenStatic,
adLockOptimistic, adCmdUnknown); //钢坯轮廓参数相关
m_pDoc->m_dlgAccess.m_pRecordset1.CreateInstance("ADODB.Recordset");
m_pDoc->m_dlgAccess.m_pRecordset1->Open("select * from 裂纹信息 order
by 时间", theApp.m_pConnection.GetInterfacePtr(), adOpenStatic,
adLockOptimistic, adCmdUnknown); //钢坯表面裂纹相关
```

(6) 数据导入、查看等功能：

1、从测量钢坯轮廓参数数据到导入数据库，以及发现裂纹将裂纹信息导入数据库的流程图如图 5-27 所示。

由 5.5.2 节可得，计算出轮廓参数传达给 CDlgAccess 类对象也是在 CDataView 类成员函数 GetCircleOutlineInfo() 中实现，而发现裂纹后参数传递是在 CBilletMeasureDoc 类的 ImageProcessCrazeL() 函数中实现，相关函数调用如下：

```
m_pDoc->m_dlgAccess.InputInitialData(m_pDoc->m_OutlineMeas); //轮廓参数
m_dlgAccess.InputCrack(); //向数据库中导入裂纹特征参数数据
```

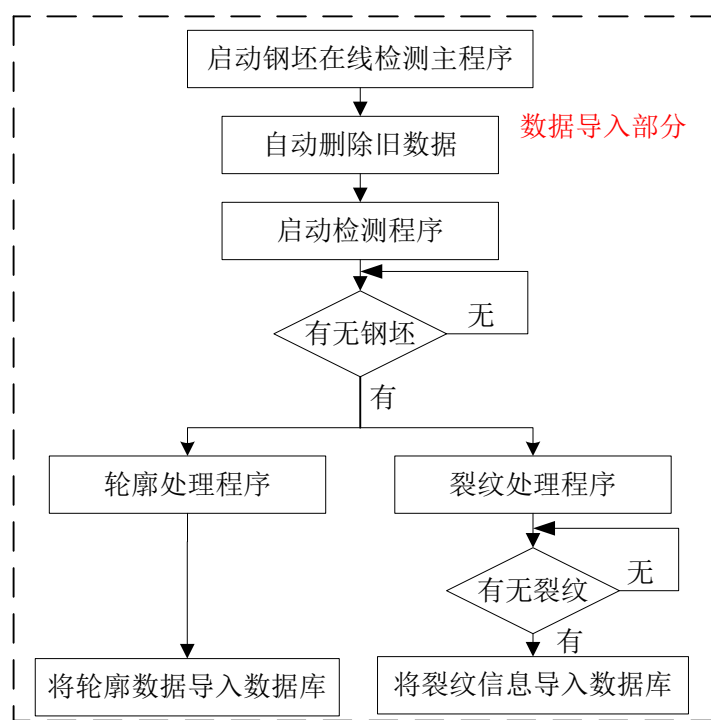


图 5-27 数据导入数据库流程图

2、在启动系统之后，点击主界面下方的“数据库”按钮，便可打开数据库浏览界面，系统会自动加载数据库中的钢坯轮廓信息与裂纹信息，可以实时的查看当前相关信息，还可以对某一时间段内的数据进行筛选，点击裂纹信息相关数据查看相关的裂纹图像，基本流程如图 5-28 所示。

轮廓数据和裂纹数据的加载通过 CDlgAccess 类中的 ReadMessage() 函数实现：

```
void CDlgAccess::ReadMessage();
```

启动数据库浏览界面如图 5-29 所示。

筛选数据功能，如图 5-30 所示，通过 CDlgAccess 类中的 OnFilter() 函数实现：

```
void CDlgAccess::OnFilter();
```

筛选数据可以判断时间输入是否规范，如不规范，则提示，如图 5-31 所示。

另外可以通过点击左侧裂纹信息一栏中具体一行参数信息查看相关的带裂纹的钢坯图像，如图 5-32 所示，此功能通过 OnClickUserlist()函数实现：

```
void CDlgAccess::OnClickUserlist(NMHDR* pNMHDR, LRESULT* pResult);
```

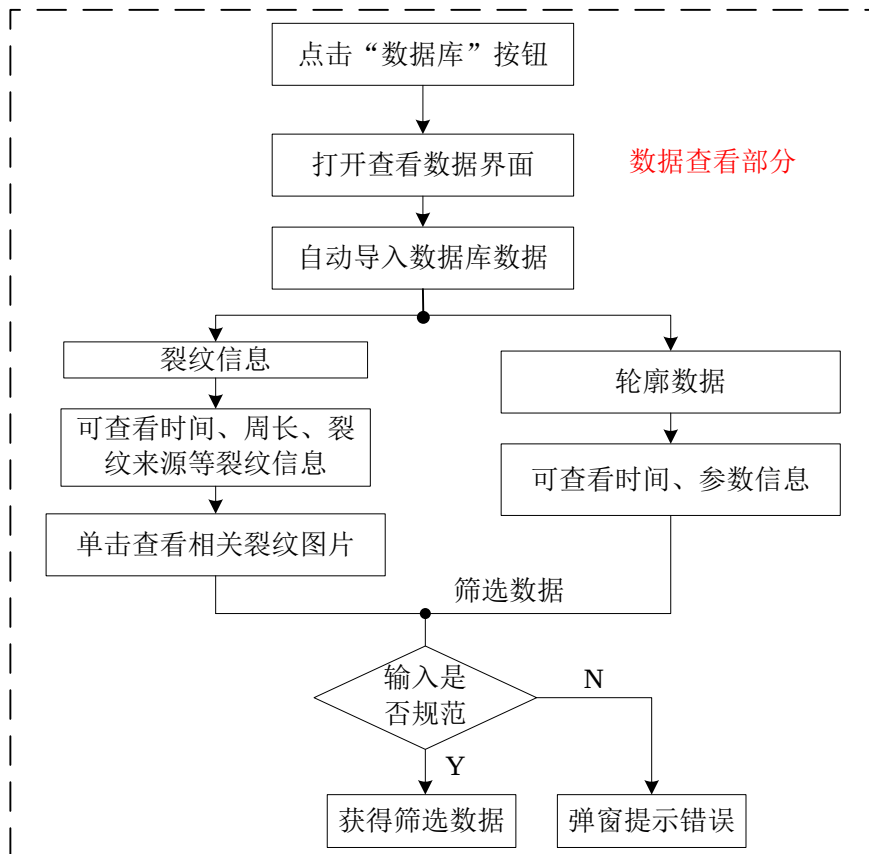


图 5-28 查看数据库数据流程图

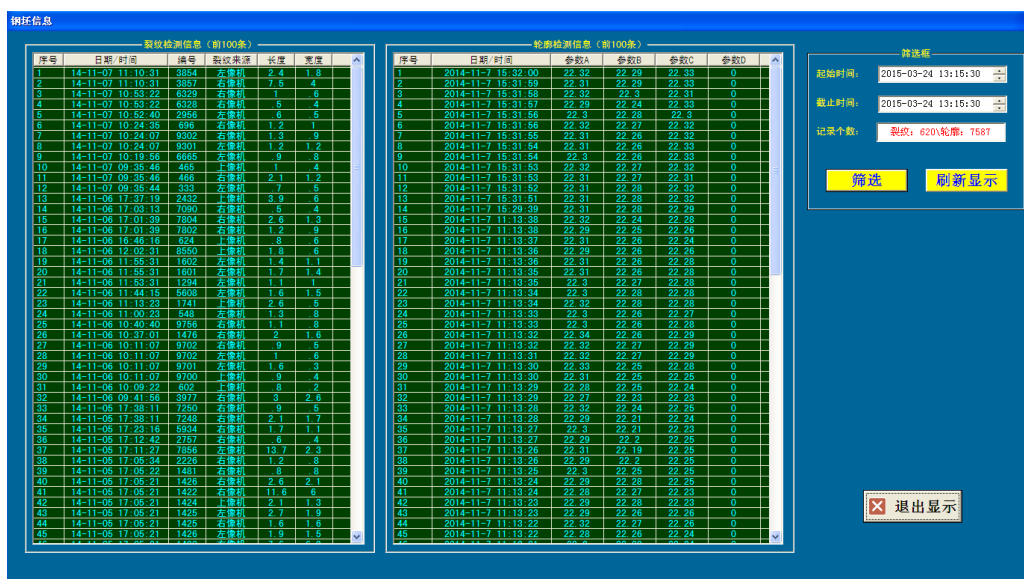


图 5-29 数据库浏览界面

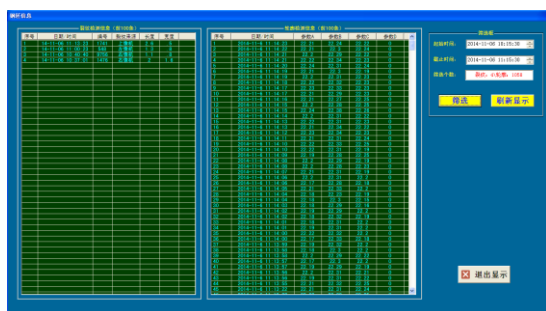


图 5-30 数据库筛选功能图示

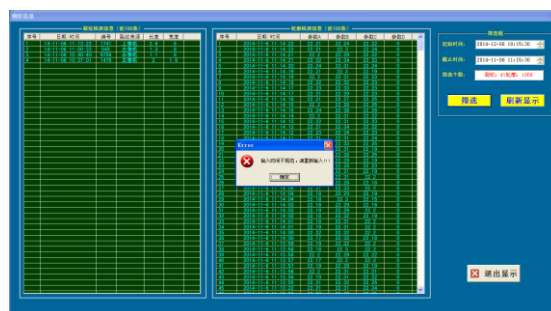


图 5-31 输入时间不规范提示

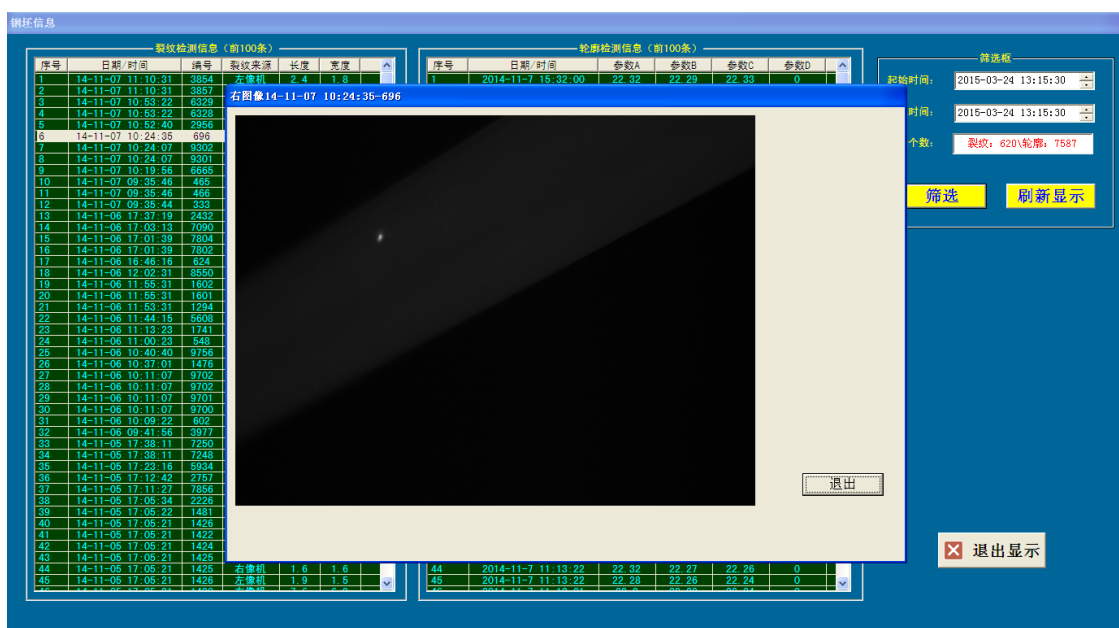


图 5-32 点击裂纹信息查看钢坯图像示意图

5.8 轮廓参数的波形显示

5.5 节讲述了圆钢与六角钢的轮廓测量实现过程, 为了能直观有效地对钢坯的轮廓参数的波动情况进行观察, 开发了钢坯轮廓参数波形图监测界面。圆钢与六角钢的轮廓参数波形图监测界面如图 5-33 所示, 它能够实时显示不同型号被测钢坯的轮廓参数波形图, 生产工人根据参数波动情况, 对生产线进行及时调整。

软件系统中此功能由 `CDlgWaveForm` 类完成, 从测量出钢坯参数到波形图显示, 数据传递过程如图 5-34 所示。

在 `CDataView` 类成员函数 `GetCircleOutlineInfo()` 以及 `GetPrismaticOutlineInfo()` 中求出圆钢与六角钢的轮廓参数后, 都调用 `CDlgWaveForm` 类的成员函数 `IsWaveShow()` 完成界面绘制及参数波形显示, 调用如下:

```
m_pDoc->m_DlgWaveForm.IsWaveShow(m_pDoc->m_OutlineMeas);
```

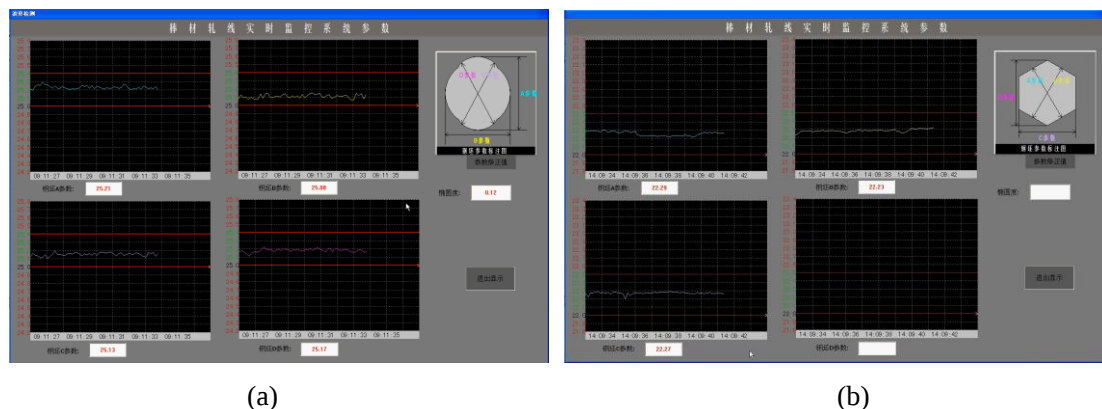


图 5-33 钢坯轮廓参数波形图监测界面

(a) 圆钢轮廓参数波形图监测界面；(b) 六角钢轮廓参数波形图监测界面

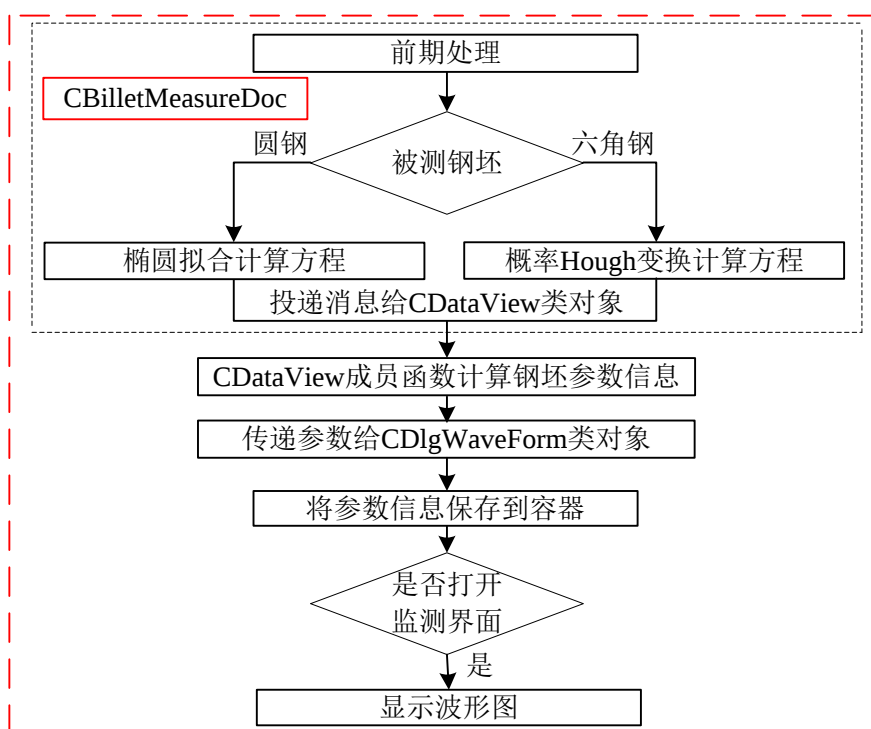


图 5-34 参数计算到波形显示流程图

5.9 异常情况的处理

5.9.1 摄像机温度过高

程序运行过程中会实时的监测摄像机的温度，当温度超标后会弹出对话框提示，此功能通过 CControlView 类成员函数 ThreadProcTempature()实现：

```
unsigned __stdcall CControlView::ThreadProcTempature(LPVOID lpParameter);
```

5.9.2 声报警

为了方便生产工人及时发现钢坯参数超标及检测出裂纹等情况，及时调整生产工艺避免不必要的损失，开发了报警功能，基本过程是比较测量出的钢坯轮廓参数与生产的标准尺寸对比，如果超出误差范围则进行报警，并弹出对话框提示哪一参数超标，另外在检测过程中发现裂纹也会进行报警；在报警的同时，相关提示按钮会不断闪烁，轮廓参数超标时主界面变化如图 5-35 所示，检测出裂纹时主界面变化如 5.6 节中的图 5-26 所示。

出现轮廓尺寸超标情况时，报警功能是在 `CDlgWaveForm` 类的类成员函数 `ThreadOutLineWarningA()` 中实现；发现裂纹时，报警功能是在 `CBilletMeasureDoc` 类成员函数 `CrackCheck()` 中实现。

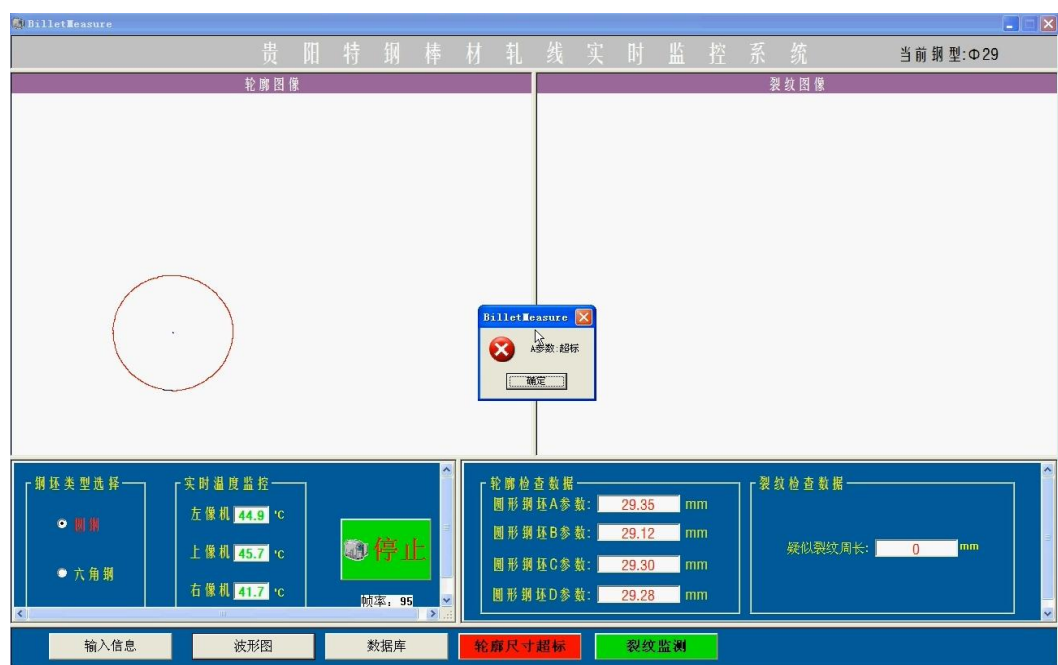


图 5-35 钢坯轮廓尺寸超标的主界面图

5.10 本章小结

本章根据第四章的软件系统设计，实现对欢迎界面及主界面的设计，进而围绕软件系统的两大功能，钢坯轮廓测量和表面裂纹检测进行展开，对软件系统各个模块的进行实现，期间通过流程图的分析对主要功能相关代码的实现进行了说明。

第六章 系统测试与运行

6.1 系统测试

系统测试环节是软件开发过程中必需的步骤，软件测试是指在一定的条件下测试系统观察和记录结果，对系统的不同方面做出结果性的评价的过程。

因为任何技术和方法都不是完美的，软件设计必然存在瑕疵或错误的可能性，开发人员没有完全消除这种可能的办法。所以，在系统运行前，必须通过系统测试，发现软件设计方面的缺陷，从而不断地减低错误发生的机率，来提高软件的可靠性。

在本软件系统开发过程中，主要针对模块功能进行了测试，主要测试内容如下：

1) 轮廓测量测试。

对不同尺寸和型号进行连续测量，测试所写算法的适用性；故意选错钢坯的尺寸，测试系统是否进行报警提示；无被测钢坯下启动程序，测试系统是否出现异常情况；在关闭激光器的情况下测量，测试系统对环境光的抗干扰能力。

2) 裂纹检测测试。

选取不同方向的裂纹图片进行检测，测试检测算法的鲁棒性；选取多幅无裂纹的图片进行检测，测试检测算法的稳定性。

3) 数据存储与查看测试。

模拟数据输入，测试导入数据模块的稳定性；模拟错误数据导入，测试导入数据模块的容错性；导入数据的同时，对数据库中数据进行查看，测试对数据库读写的互斥性。

6.2 系统运行

首先给出系统运行时测量出的几种型号的单像素轮廓图像，如图 6-1 所示；然后分别在实验室环境和贵钢现场环境下运行检测系统，由于实验室环境下无法模拟高温钢坯表面裂纹检测，所以通过对两种不同环境下的钢坯轮廓参数进行测量对比，验证软件系统的可靠性。

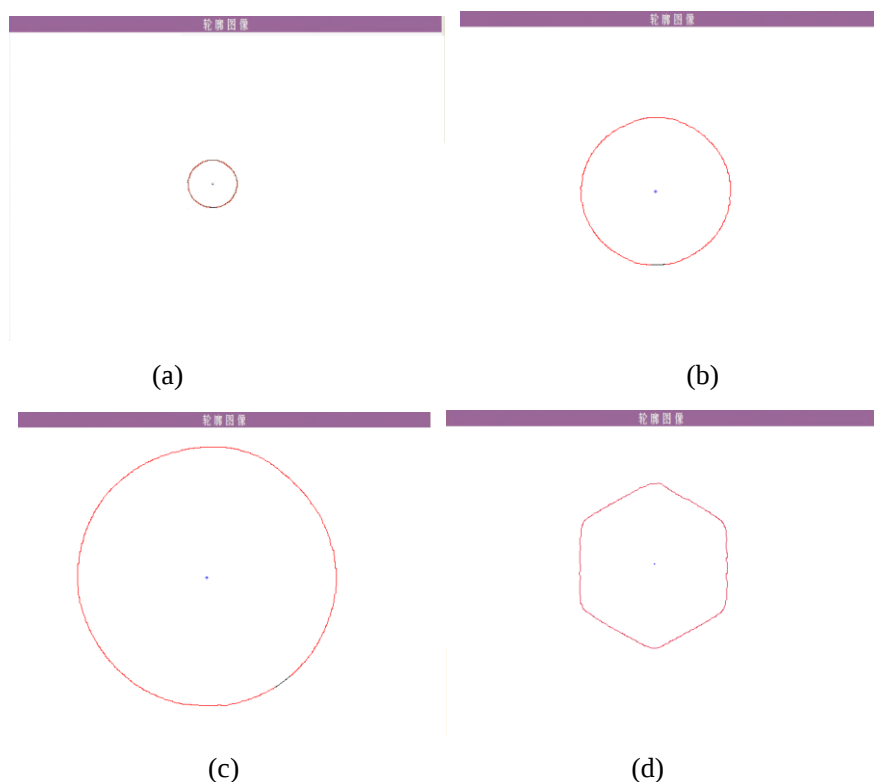


图 6-1 测量出的单像素轮廓图像

(a) $\Phi 14$ 圆钢; (b) $\Phi 22$ 圆钢; (c) $\Phi 40$ 圆钢; (d) $H22$ 六角钢

6.2.1 实验室环境下运行

在实验室下，利用贵钢生产的标准圆钢和六角钢进行实验，如图 6-2 所示，钢坯型号从左到右分别为： $\Phi 14$ 、 $\Phi 22$ 、 $H22$ 和 $\Phi 40$ ，其中 $H22$ 是直径为 22 mm 的六角钢，其它为对应不同尺寸的圆钢。

下面分别对上述钢坯进行钢坯轮廓参数测量，其参数测量结果以及与标准尺寸测量结果对比如表 6-1 所示。



图 6-2 实验用的标准钢坯

由表 6-1 的实验对比结果可知，在实验室环境下，对不同型号和尺寸的钢坯进行测量均能得到良好的测量结果，相比于用游标卡尺测量所得的数据，利用测量系统测量所得结果的误差在 0.2 mm 以内。

表 6-1 实验室环境下系统测量结果对比

钢坯 型号	游标卡尺测量（mm） （100 次测量取平均值所得）				检测系统测量（mm） （100 次测量取平均值所得）				误差（mm）
	A	B	C	D	A	B	C	D	Δ
Φ14	14.29	13.85	14.18	14.12	14.18	13.72	14.01	14.03	± 0.17
					14.14	13.78	14.10	14.10	
					14.16	13.74	14.12	14.11	
Φ22	22.56	22.46	22.52	22.53	22.45	22.30	22.39	22.40	± 0.19
					22.40	22.27	22.33	22.34	
					22.51	22.36	22.47	22.44	
Φ40	40.35	40.27	40.31	40.29	40.38	40.30	40.34	40.33	± 0.06
					40.40	40.33	40.36	40.34	
					40.36	40.28	40.29	40.31	
H22	22.26	22.24	22.22	无	22.25	22.22	22.20	无	± 0.05
					22.27	22.28	22.25	无	
					22.29	22.26	22.27	无	

表中所示误差为检测系统测量所得数据与游标卡尺测量数据的最大差值。

为了更加直观的观察实验结果，分别利用不同形状对测量结果数据进行标记，纵坐标方向用于查看测量数据，进行结果对比；横坐标是为了方便查看，在测量数据的基础上加上一定的间隔形成的。Φ14、Φ22、Φ40、H22 的结果对比，分别如图 6-3 至 6-6 所示。

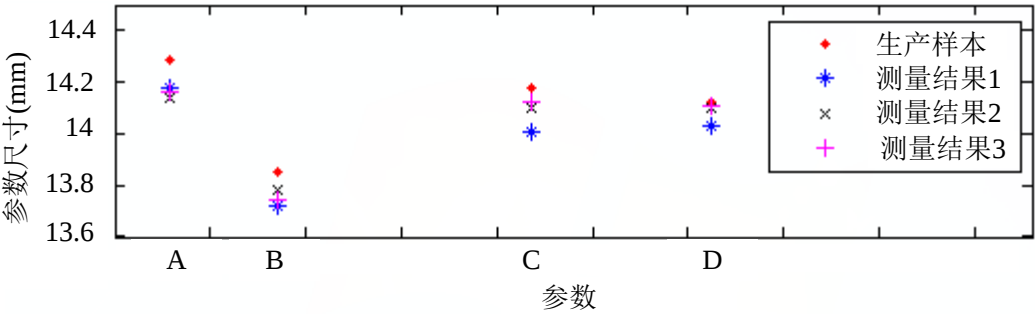


图 6-3 型号为 Φ14 钢坯的实验室测量结果对比图

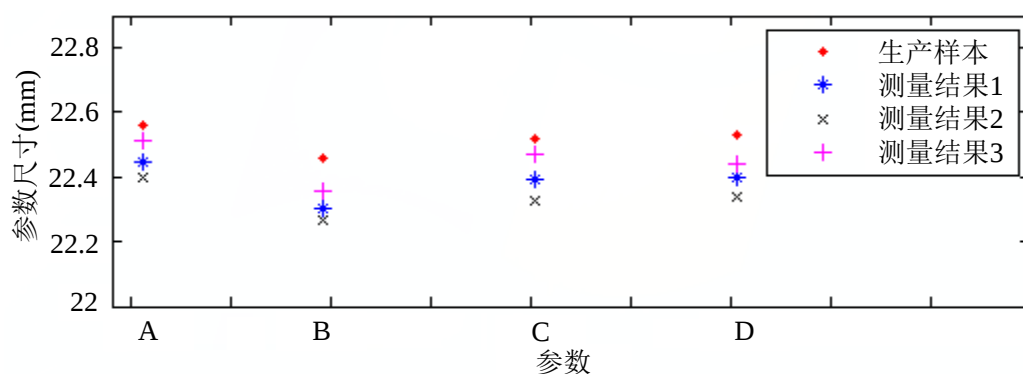


图 6-4 型号为 $\Phi 22$ 钢坯的实验室测量结果对比图

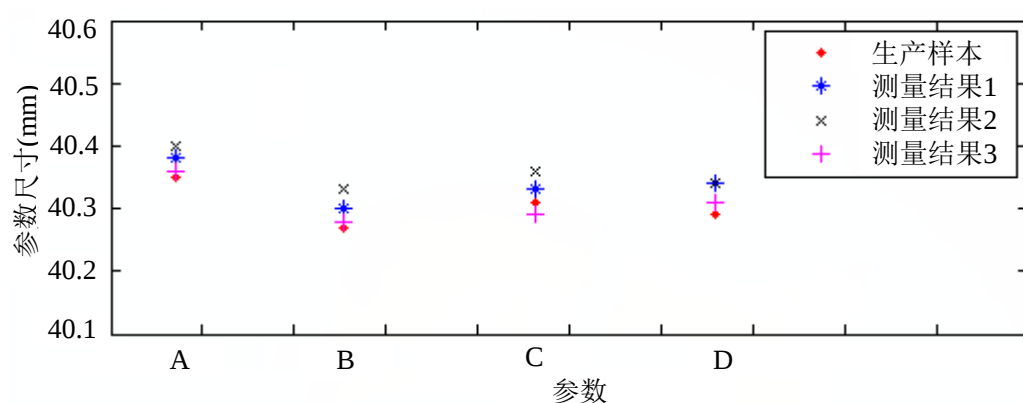


图 6-5 型号为 $\Phi 40$ 钢坯的实验室测量结果对比图

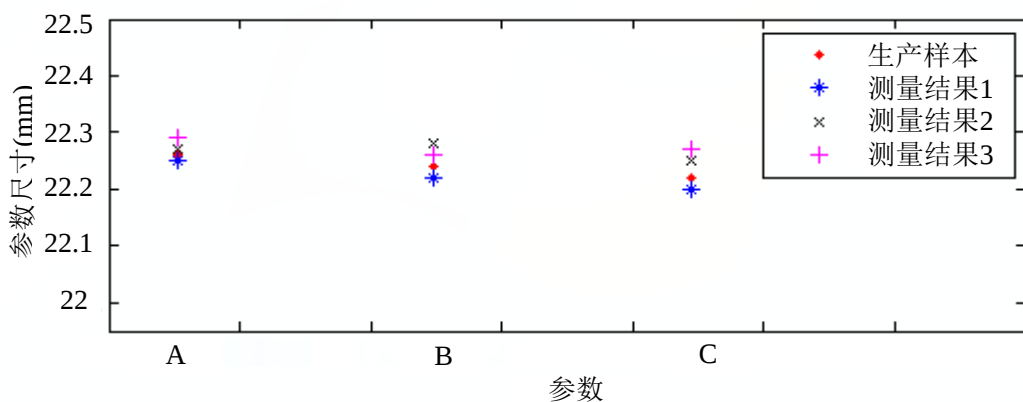


图 6-6 型号为 $H22$ 钢坯的实验室测量结果对比图

6.2.2 贵钢现场环境下运行

在轧钢过程中，钢坯轮廓尺寸在要求的误差范围内则属于合格产品，各型号
的钢坯误差可以根据实际情况自行调整。在贵钢现场测量过程中，每次轧钢后选
取合格产品进行人工测量与测量系统结果进行对比，如表 6-2 所示。

表 6-2 贵钢现场系统测量结果对比

规格 尺寸	生产样本（ <i>mm</i> ） （100 次测量取平均值所得）				测量系统（ <i>mm</i> ） （100 次测量取平均值所得）				误差（ <i>mm</i> ）
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	Δ
$\Phi 14$	14.19	14.08	14.10	14.10	14.39	14.28	14.30	14.31	± 0.21
					14.28	14.20	14.24	14.26	
					14.18	14.09	14.12	14.14	
$\Phi 22$	22.25	22.20	22.23	22.22	22.34	22.28	22.31	22.32	± 0.16
					22.40	22.35	22.39	22.37	
					22.37	22.31	22.34	22.35	
$\Phi 30$	30.42	30.26	30.33	30.35	30.72	30.52	30.63	30.68	± 0.33
					30.68	30.50	30.55	30.61	
					30.54	30.47	30.50	30.32	
<i>H</i> 22	22.25	22.23	22.26	无	22.21	22.16	22.20	无	± 0.08
					22.19	22.17	22.18	无	
					22.24	22.29	22.29	无	
<i>H</i> 25	25.22	25.19	25.23	无	25.13	25.07	25.09	无	± 0.19
					25.15	25.09	25.07	无	
					25.03	25.13	25.08	无	

其中表中所示误差为测量系统所得数据与生产样本所测数据的最大差值。

与上一节一样，也采用同样的方法对测量结果进行对比， $\Phi 14$ 、 $\Phi 22$ 、 $\Phi 30$ 、*H*22 和 *H*25 的结果对比，分别如图 6-7 至 6-11 所示。

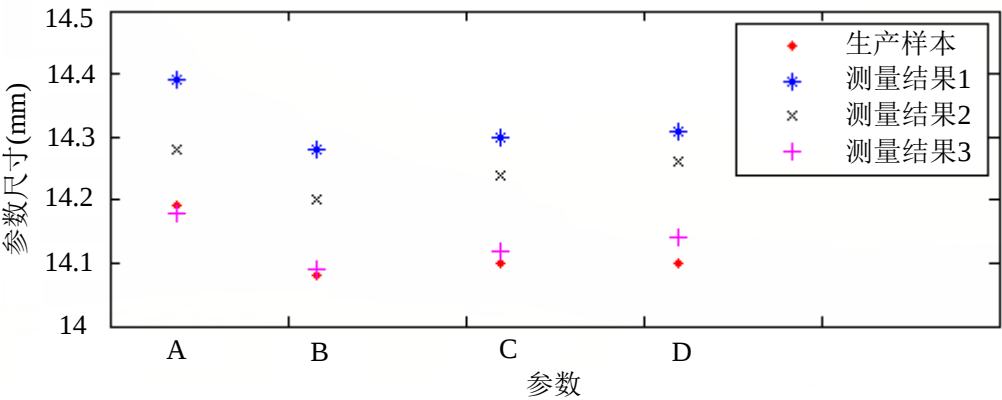


图 6-7 型号为 Φ14 钢坯的现场测量结果对比图

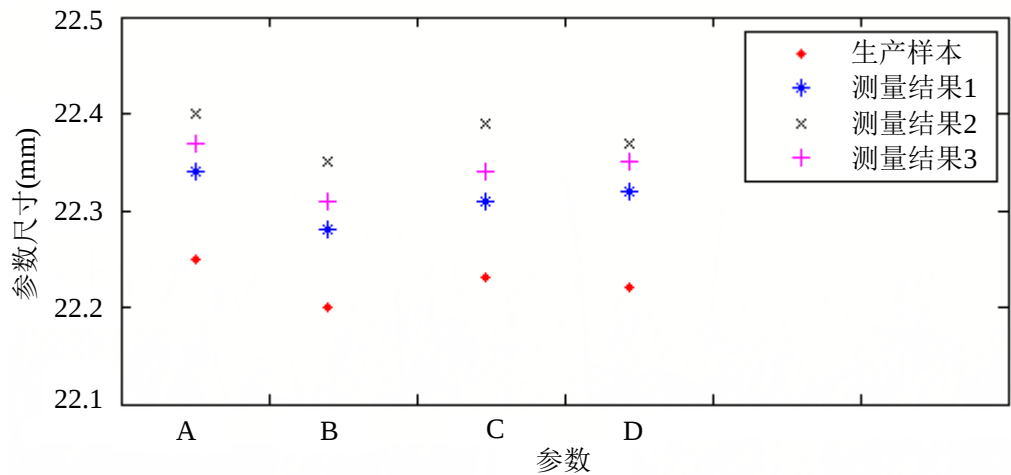


图 6-8 型号为 $\Phi 22$ 钢坯的现场测量结果对比图

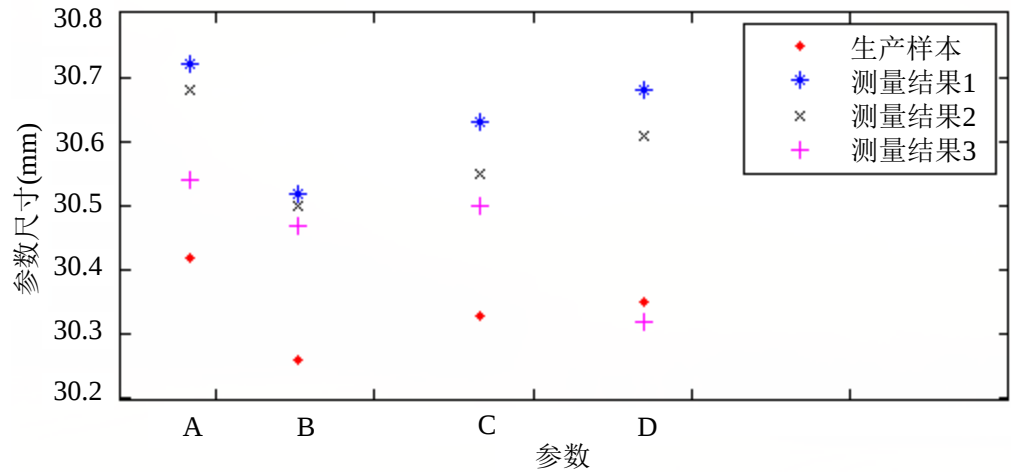


图 6-9 型号为 $\Phi 30$ 钢坯的现场测量结果对比图

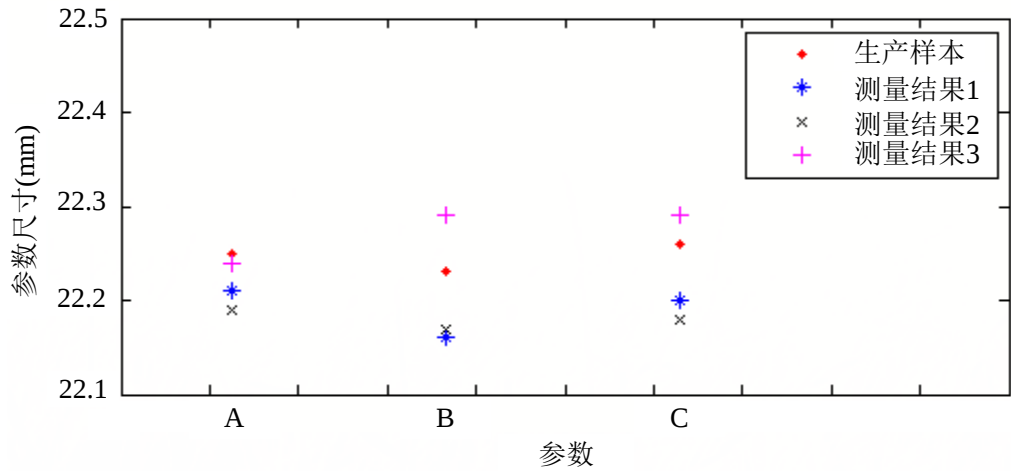
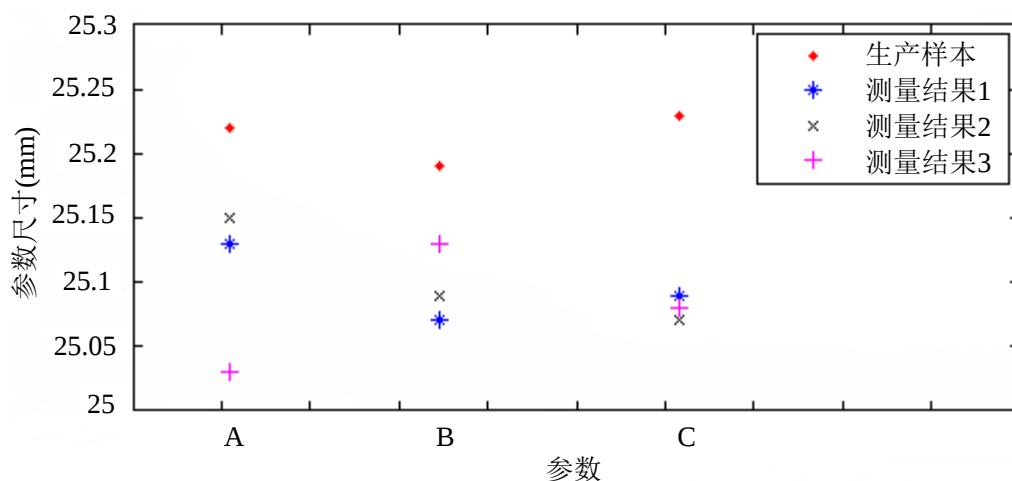


图 6-10 型号为 $H22$ 钢坯的现场测量结果对比图

图 6-11 型号为 *H25* 钢坯的现场测量结果对比图

由实验结果可得：系统在贵钢轧钢现场测量时，相对实验室环境下，参数测量的误差精度稍有下降，其误差在 $\pm 0.30\text{mm}$ 左右，但达到了钢坯轮廓尺度所要求的误差精度。

其中，引起误差的原因主要包括前期标定所带来的误差、测量设备在生产线上的抖动和钢坯生产本身存在的误差等。误差无法根除，但希望后续系统升级通过以下途径来进一步减小误差：

- 1、对硬件设备进行改进，以适应高抖动的生产环境；
- 2、优化摄像机标定方法和误差补偿算法，是标定精度进一步提升；
- 3、优化轮廓参数计算算法，使获得轮廓参数更加准确。

6.3 本章小结

本章首先介绍软件开发过程中进行的系统测试，以提高系统的可靠性；然后进行系统运行实验，分别在实验室环境和贵钢现场环境下对钢坯轮廓进行测量，并利用图形方式对系统测量结果与实际钢坯尺寸进行直观地对比，最终测量系统可以得到在误差范围内的结果数据，验证了测量系统的准确性。同时对系统的测量误差进行分析并提出了改进办法。

第七章 总结与展望

7.1 工作总结

我国还处在经济全面建设期，对钢材的需求与日俱增，随着发展的深入，对钢材的质量要求也随之增强。然而钢铁是一种高温环境下的产物，传统的测量手段，无法及时快速的对其生产质量进行监测。随着计算机技术的不断发展，基于机器视觉的非接触式轮廓测量技术得到钢铁企业的关注，其具有无损坏、高精度和抗干扰等优点。本系统利用线结构光激光器作为线结构光光源，同时利用多传感器对钢坯进行图像捕获，对高温钢坯进行无损测量。本测量系统相较于国外的大部分同类产品的优势在于不仅能够实现对高温钢坯轮廓尺度的测量，还可以对钢坯的表面裂纹进行检测。

本文的主要工作内容如下：

1、摄像机标定方面，从线性摄像机模型出发，根据 Tsai 提出的两步法，在线结构光单目摄像机标定的基础上，提出了适用于本测量系统的线结构光三目传感器标定的方法。该方法的标定由于在同一世界坐标系下进行，故只需一幅图像，使得标定算法简单，降低了标定的时间成本。并提出了有效的系统标定误差校正，进一步提高了标定精度。

2、从高温钢坯轮廓测量的基本需求出发，提出了线结构光三目传感器机器视觉钢坯测量系统，完全解决了双目测量系统视场不足的问题，同时还能对钢坯表面裂纹进行检测，使系统可用性得到提升。

3、软件系统方面，根据需求分析，为了方便一线工人的使用，设计出了界面友好，操作逻辑简单的系统操作界面；在能够很好完成测量的同时，添加了钢坯轮廓参数波形图显示界面以及数据库查询界面，方便观察钢坯轮廓参数波动情况和查看以往的轮廓参数和裂纹信息；另外实现了报警功能，在轮廓信息超标或发现裂纹时能够及时地通知工人。

4、根据圆钢与六角钢的不同，分别提出了基于椭圆拟合算法和概率 Hough 变换算法的测量方法，分别对圆钢和六角钢的轮廓参数进行测量。特别是在对六角钢进行测量时针对 Hough 变换会检测出多余碎线段的缺点，对检测出的直线利用容器存放，每组共线的线段中选择最长的一条作为六角钢的边，这样有效解决了测量系统不稳定的情况。

5、在实验室环境进行测量实验的前提下，多次到贵钢现场进行在线测量，对测量系统进行不断改进与优化，使测量系统的稳定性和精确性得到了极大的提高。

7.2 工作展望

本课题所研究的高温钢坯机器视觉在线检测系统在配套的硬件系统下已经完成了软件系统开发，该软件系统得益于三目摄像机，能够对全尺寸的圆钢和六角钢进行轮廓尺度的测量以及表面裂纹的检测。后期系统开发与投入生产运行过程中，还有如下几个方面需要改进和优化：

1、硬件系统的框架设计的改进：激光器的固定支架需要改进，应直接锁死在框架上以使激光器更加牢固；由于前期设计只考虑两个摄像机的情况，所以现有的三个摄像机固定方式及位置需要调整，使得系统更加稳定可靠；整体框架进行调整，以适应高抖动的生产环境。

2、软件操作界面方面的完善：通过系统的试运行，让一线工人实际使用，参考他们的使用感受和意见，使操作界面变得更简单易用。

3、测量轮廓时，由于需打开激光器，现阶段没有对裂纹进行检测，后期软件算法设计中，要添加对钢坯激光光带进行屏蔽操作，完成对其他区域的裂纹检测的功能，防止裂纹的漏检。

4、软件系统设计方面，优化系统逻辑以及类与类之间的消息传递方式，完善多线程技术，使系统运行更加稳定，处理更加快速。

致 谢

伴随着三年硕士学习的即将落幕，整整二十年的求学生涯也告一段落，感谢为我辛勤付出和给予陪伴的老师，同学，朋友和家人们。

本论文是在导师张利勋老师和余学才教授悉心指导下完成的，首先对张老师和余老师表达我的万分谢意。张老师治学严谨、勇于创新、为人诚恳、待人和蔼，在生活和学习上都给了我很多指导，特别是在软件算法方面给我很大的启发和帮助；余老师渊博的知识、忘我的工作精神、求真务实的科研作风、对待学术的一丝不苟使我受益匪浅。硕士生涯中，两位恩师以身作则，在悉心指导、严格要求和不断鼓励下，使我分析和独立解决问题的能力得以充分发挥。再次向两位恩师表示衷心的感谢。

感谢付邦瑞、王玉杰、李林林、卢磊同学以及万聪灵师兄，在学习上和生活上给予的鼓励和帮助，特别是付邦瑞细心的陪伴，王玉杰在课题上的极力支持以及万聪灵师兄在研究方向的指引。

特别感谢家人和女朋友对我的关怀与支持，是你们给了我的不畏艰难和勇敢前行的力量，同时感谢班级和教研室同学们的陪伴与成长。

感谢首钢贵钢，特别是第三轧钢厂的唐斌部长在课题上给予的实验平台和人力支持。

最后，衷心地感谢电子科技大学对我多年的培养。

参考文献

- [1] 罗胜彬, 宋春华, 等. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 150-153
- [2] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000, 56-150
- [3] 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
- [4] J. B. Liao, M. H. Wu. A coordinate measuring machine vision system[J]. Computers in Industry, 1999, 10(38): 239-248
- [5] 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
- [6] R. Y. Tsai. 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
- [7] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2000, 22(11): 1330-1334
- [8] D. A. Forsyth, J. Ponce. Computer Vision[M]. Inc: Prentice Hall, 2003, 10-22
- [9] J. Beveridge, R. Wiener. Multithreading applications in Win32: the complete guide to threads [M]. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1996, 4-5
- [10] 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
- [11] 张铮, 王艳平, 薛桂香, 等. 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, 8-9
- [12] 佚名. 3D 动态工业照相机成像技术定位仪工作原理解析(八)[J]. 汽车维修与保养, 2011, (5)
- [13] 张琦. 机器视觉系统的原理及现状[J]. 电子工业专用设备, 1999, 4(28): 20-21
- [14] 翟新涛. 基于双目线结构光的大型工件测量[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008, 34-50
- [15] G. Hu, G. Stockman. 3-D surface solution using structured light and constraint propagation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1989, 11(4): 390-402
- [16] D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir. Range imaging with adaptive color structured light[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 1998, 20(5): 470-480
- [17] K. L. Boyer, A. C. Kak. Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 1987, 9(1): 14-28
- [18] 吴庆阳. 线结构光三维传感中关键技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2006, 40-53
- [19] 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, 10-59

- [20] 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
- [21] 王文格. 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]. 湖南: 湖南大学, 2003, 30-48
- [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] J. Heikkila, O. Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, 1106-1112
- [24] R. Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[J]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, 1986, 364-374
- [25] J. Y. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1992, 14(10): 965 - 980
- [26] R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. Robotics and Automation, IEEE Journal of, 1987, 3(4): 323-344
- [27] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55
- [28] Seasholtz, Kowalski. Qualitative Information from Multivariate Calibration Models[J]. Applied Spectroscopy, 1990, 44(8): 1337-1348
- [29] 于泓. 摄像机标定算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2006, 3-6
- [30] Z. Zhang. Flexible Camera Calibration By Viewing A Plane From Unknown Orientations[J]. IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 1: 666-673
- [31] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2000, 22(11): 1330-1334
- [32] 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
- [33] 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
- [34] 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
- [35] 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
- [36] 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

- [37] 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
- [38] R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing Third Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011, 20-500
- [39] N. A. Otsu. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Trans, 1979, 9(1): 62-66
- [40] 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
- [41] 齐丽娜, 张博, 王战凯. 最大类间方差法在图像处理中的应用[J]. 无线电工程, 2006, 36(7): 25-26, 41
- [42] 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
- [43] T. Pavlidis. Algorithms for Graphics and Image Processing[M]. Rockville Washington D C USA: Computer Science Press, 1982, 30-402
- [44] R. T. Chin, H. K. Wan, D. L. Stover, et al. A one-pass thinning algorithm and its parallel implementation[J]. Computer Vision Graphics Image Processing, 1987, 40(1): 30-40
- [45] R. W. Hall. Fast parallel thinning algorithms: parallel speed and connectivity preservation[J]. Communication of ACM, 1989, 32(1): 124-131
- [46] 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
- [47] Z. Guo, W. H. Richard. Parallel thinning with two-subiteration algorithms[J]. Communications of ACM, 1989, 32(3): 359-373
- [48] 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
- [49] T. Y. Zhang, C. Y. Suen. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Comm ACM, 1984, 27(5): 236-239
- [50] 牟少敏, 杜海洋, 苏平, 等. 一种改进的快速并行细化算法[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(1): 53-55
- [51] C. M. Holt, A. Stewart, M. Clint, et al. An improved parallel thinning algorithm[J]. Com. of ACM, 1987, 30(2): 156-160
- [52] 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 ISTIC PKU, 2006, 23: 60-63
- [53] H. K. Yuen, J. Illingworth, J. Kittler. Ellipse Detection using the Hough transform[C]. Proceedings of the Forth Alvey Vision Conference, 1988, 60-64

- [54] F. A. Siegel. Robust regression using repeated medians[J]. *Biometrika*, 1982, 69(1): 242-244
- [55] A. Fitzgibbon, M. Pilu, R. B. Fisher. Direct least square fitting of ellipses[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 476-480
- [56] 华瑞娟. 多椭圆拟合的算法研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010, 4-15
- [57] R. C. Stone. Digital centering algorithms for the sun, moon, and planets[J]. *Astronomical Journal*, 1990, 99(1): 424-430
- [58] 曹芳. 计算机视觉中的各点异性回归技术[D]. 上海: 上海海事大学, 2004, 40-57
- [59] 张伟. 求解正则式方程式集合的面向矩阵高斯主元消去法[J]. *计算机研究与发展*, 1995, 32(12): 50-55
- [60] 晁阳. 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
- [61] T. T. Nguyen, X. D. Pham, D. Kim, et al. A test framework for the accuracy of line detection by Hough Transforms[J]. *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2008, 1528-1533
- [62] 卢惠民, 郑志强. 一种新的用于检测直线的快速 Hough 变换[J]. *计算机应用*, 2005, 25(10): 2379-2380
- [63] 杨全银. 基于 Hough 变换的图像形状特征检测[D]. 济南: 山东大学, 2009, 35-38
- [64] L. Xu, E. Oja, P. Kultanen. A new curve detection method: randomized Hough transform[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331-338
- [65] 戴渊明, 张翔, 王再富. 基于改进概率霍夫变换算法的车道检测方法研究[J]. *杭州电子科技大学学报*, 2006, 26(5): 91-95

攻读硕士学位期间取得的成果

- [1] 余学才, 王玉杰, 纪国超, 吴树林. 一种线结构光机器视觉六角钢坯轮廓测量装置及方法[P]. 中国, 发明专利, 201410487468, 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
- [3] 余学才, 王玉杰, 毛康, 纪国超. 镜面目标轮廓光学测量系统和方法[P]. 中国, 发明专利, 201410484119, 2014. 09. 22