

Abstract

The contact line over the pantograph slides fast when the locomotion operates at high-speed. It will tend to cause power accident if the location of the line deviates too large. In order to assure that the lines and the locomotion operate normally, it is necessary to ensure the security of catenary and detect catenary geometry parameters frequently. Traditional detection approach tests data by the contact of the line and sensors installed on the pantograph. However, applying the traditional detection method on high-speed catenary testing will affect the following behaviors of pantograph and reduce the similarity between detection pantograph and actual pantograph on account of the vibration of high-speed catenary is always higher than the regular speed catenary, which results in the error of catenary detection parameters. Therefore, it is an urgent need to adopt new methods, new ideas for promoting the catenary detection technology development.

This paper designs high-speed catenary dynamic parameters detection system based on image processing by tracking the trend of catenary dynamic detection domestic and overseas and considering the features about high-speed catenary detection fully. This system can achieve non-contact real-time detection of catenary geometric parameters by using Onuris linear array cameras installed on the locomotion to photogrammetry survey and applying optical triangulation principle and image processing technology.

According to the distance of sampling points on space about the current frame is smaller than its image data before and after that frame, the value of image gray of adjacent frames and some other traits. The steps of image processing methods the paper used are as follows: firstly, frame of the current image and its adjacent frames before and after it are implemented the differential operation to eliminate the affection of uneven background; secondly, the contrast ratio between the contact line objective imagination and background can be improved by balancing image

processing and enriching image information; thirdly, gray image first division can be realized and segmentation threshold can be determined by using Otsu algorithms, and fragmented interference objectives in image can be removed by domain division method; Finally, continuous of the contact line object image can be realized by using closed operation of mathematical morphology on binary image. In the paper, mathematics model of catenary objects forecast and tracking is built to remove interference objectives again and realize the computing of catenary geometric parameters. According to the character of locomotive running and factor of detection systems itself, the paper analyses the reasons for the system error and puts forward the corresponding compensation methods.

Hardware architecture and holistic designation of software of the detection system are discussed systematically in the paper. The rationality and feasibility of system's designation is proved by debugging operation.

Keywords: OCS(Overhead Contact System); Non-contact Detection; Image Processing

西南交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南交通大学可以将本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、缩印或扫描等复印手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1. 保密□，在 年解密后适用本授权书；
2. 不保密，使用本授权书。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：蔡学敬
日期：2008.6.18

指导老师签名：陈浩龙
日期：2008.6.18

西南交通大学学位论文创新性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是在导师指导下独立进行研究工作所得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

本学位论文的主要创新点如下：

第 1 章 绪论

1.1 课题背景及意义

国内外铁路运营经验和实践表明,铁路电气化是铁路现代化的重要标志,重载和高速是整个铁路发展的方向。近十多年来,我国电气化铁路建设规模正在逐步扩大,全国主要铁路干线为提高列车运营速度而进行了大量的技术改造。2006年9月,我国电气化铁路总里程突破2.4万公里,铁路电气化率达到27%,初步形成了布局合理、标准统一的电气化铁路运营网络。预计到2010年电气化铁路将占全国铁路网的30%~50%,完成铁路总运量的65%~70%^[3]。

电气化铁道供电系统主要包括接触网和牵引变电所两部分。接触网是与高速电气化铁路安全运营直接相关的架空设备:其工作环境恶劣——铁路沿线环境复杂;沿线架设且无备用,是整个牵引供电系统最为薄弱的环节;其性能的优劣直接决定电力机车受电弓的受流质量,影响列车的运行速度和安全。在电气化铁道设备故障中,接触网故障所占比例相当大。因此,要保证受电弓与接触线的良好接触和可靠取流,保证电气化铁道的安全运营,除了对接触线悬挂的设计、施工和运营有一定的要求外,还必须进行一系列检测工作,以便及时发现隐患,克服接触悬挂在某些环节中存在的问题,保证接触网处于良好的工作状态。

接触网检测系统运用技术手段对接触网参数进行在线检测,根据接触网设备可测得的和外部可辨认的特征对其工作状况进行评价^[4],检测系统一般包括以下几个部分:信号检测传感器、信号传输通道、数据采集接口、数据处理系统,如图1-1所示。在本文中,采用内置数据采集卡的Onuris线阵列高速摄像机进行原始数据采集,大大简化了检测系统的硬件结构,摄像机安装在机车车顶,对受电弓不会产生任何影响,所以在接触网动态参数测量过程中能够保持受电弓良好的跟随性。

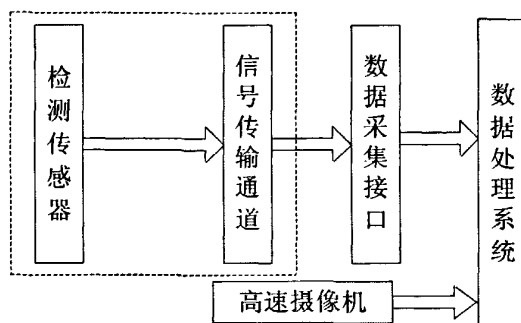


图 1-1 接触网参数检测系统框图

当前，国内对接触网参数的检测主要依靠接触式和非接触式检测方式来完成。与接触式测量方式相比，非接触式检测方式对检测对象与检测系统本身都不会产生任何损害，应用机器视觉原理研制的非接触式接触网动态检测系统具有以下特点：

(1) 完全摒弃了传统检测设备所需要的置于受电弓滑条上的传感器部件，减少了检测设备对受电弓的影响。

(2) 响应速度快，提高了接触导线高度、拉出值等参数的检测精度，能实现接触导线几何参数实时检测，适应性强。

(3) 图像信息丰富，直观性强。

(4) 数据处理系统功能全面，能自动完成检测结果的处理。

基于我国高速电气化铁路的特点，本系统在制定技术方案时，充分考虑了我国列车高速运动条件下的检测要求和摄像机镜头、照明光源和接触线三者之间的几何关系。这种从接触线检测条件出发的技术路线在视窗面积、图像拍摄速度、图像实时解析等方面都有一定的实际意义。

1.2 国内外接触网动态检测系统研究现状

由于接触网在电气化铁道牵引供电系统中的重要性和特殊性，人们早在上世纪 50 年代对接触网检测技术进行了相关的研究，取得了较好的研究成果，形成了系列产品。

1.2.1 国内接触网检测系统

铁道科学研究院在上世纪六十年代开始研究接触网检测技术，上世纪八十年代，我国自行研究出了接触网检测车，这个时期的设备主要针对 80km/h 运营的接触网^[5]，实现了离线、偏移、高度等主要项目的检测。西南交通大学从二十世纪八十年代开始研究接触网检测技术，1998 年 12 月，西南交通大学电气工程学院研制成功 JJC-1 型接触网检测装置（如图 1-2 所示），基本满足 160km/h 准高速铁路接触网检测的需要^[6]，车顶配置一台受电弓，受电弓滑板上安装有检测接触压力、加速度、拉出值等多种传感器。后来，取消了受电弓上的拉出值传感器，根据受电弓上弓网接触压力的分布情况计算拉出值，实现了检测技术的重大突破。

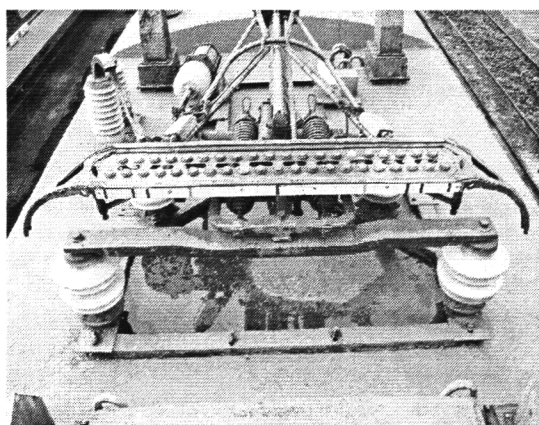


图 1-2 国产 JJC-1 型接触网检测装置

西南交通大学计算机工程学院对离线的电容进行了研究，北京师范大学模糊数学实验室对接触网检测图像处理进行了研究，西南交通大学物理系对高低隔离信息传输进行了研究，并各自取得了成绩。

基于激光雷达的接触网检测装置是在德国技术基础上发展起来的，由安装在车顶的激光雷达实时扫描接触线，采样数据经 RS232/RS485 接口与前置机进行基本数据交换，通过并口在主机系统实现用户界面显示、操作，以此实现对接触线高度及拉出值的实时监视与分析处理^[2]。

1.2.2 国外接触网检测系统

当今世界上，接触网检测系统以德国和意大利研制的装置具有代表性^[6]。从系统结构上，日本、法国和瑞士研制的接触网检测设备与德国比较接近，主要强调弓网动力学参数的测试^[6]；意大利和奥地利接触网检测设备比较接近，主要强调接触网几何参数的测试。

德国研制的接触式接触网检测装置如图 1-3 所示。它是通过在受电弓上安装压力传感器和加速度传感器，测试弓网接触压力、冲击加速度（硬点）和离线等动力学参数，并由受电弓上弓网接触压力的分布情况计算出拉出值，由受电弓框架转轴的角位移计算出接触线高度^{[8][9]}。

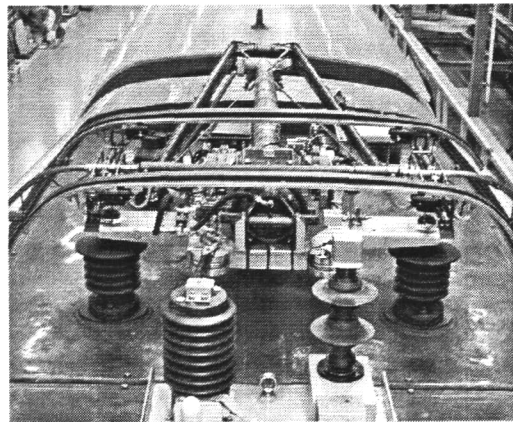


图 1-3 德国接触网检测装置

德国 BB 公司于 1982 年开始进行接触网非接触式检测装置的研制，主要采用伺服跟踪和图像处理技术。在车顶线阵布置了 4 个 CCD 摄像机和 3 个聚光灯，通过伺服跟踪移动，使接触线在 CCD 摄像机中成像，然后通过实时图像处理，计算出接触线高度和拉出值。1996 年改进后，实现了全天候检测。2000 年，采用高分辨率摄像机实现了接触线磨耗测量^[6]。该检测装置如图 1-4 所示。

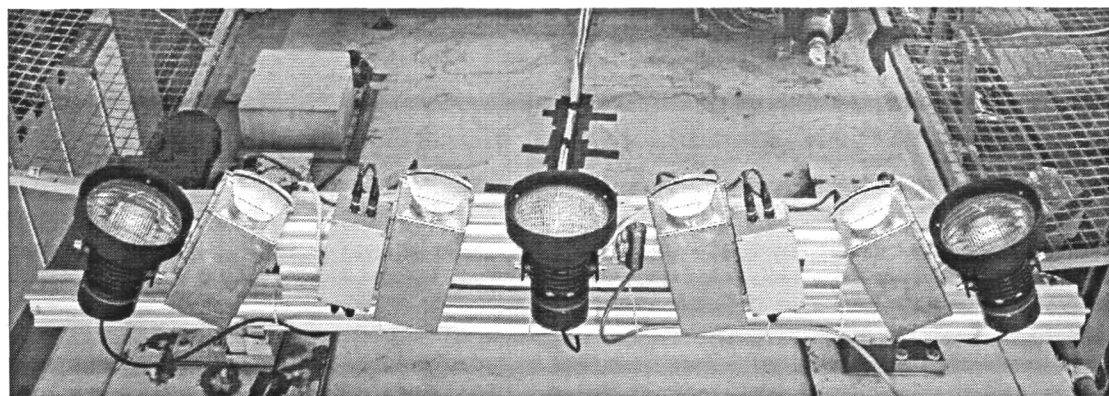


图 1-4 德国非接触接触网检测装置

九十年代，日本研制出了可在 100km/h 运行速度下检测接触网导线高度、拉出值、定位器坡度、离线、硬点、支柱号和跨距的电气车；东京交通局 1991 年研制的接触网检测车装有磨耗、拉出值、硬点、位置等几何参数的检测装置。日本接触网检测车突出检测弓网离线、接触网磨耗。法国研制的新型接触网检测车可在 270km/h 的运行速度下检测接触线的高度和拉出值，法国突出检测接触悬挂的动态弹性。意大利 TECNOGRAMMA 公司研制的接触网检测装置，主要采用激光照射、伺服跟踪及图像处理技术，检测装置中的摄像机依靠直线马达拉动，摄像机和接触线的对中取决于马达拉动摄像机的速度和摄像机的定位精度。

1.3 本文主要工作

本文在学习、借鉴当今国内外先进接触网检测技术的基础上，提出了应用图像处理技术实现高速铁路接触网几何参数动态检测的技术方案，并在此基础上完成了检测系统的设计、开发工作。这些工作主要包括：

(1) 收集、查阅了大量关于线阵 CCD 摄像机的技术资料，掌握了 Onuris 线阵高速摄像机的性能、特点、应用、及二次开发技术。

(2) 对系统进行需求分析，根据设备特点，综合考虑系统各因素后，设计出了适合我国高速铁路接触网几何参数动态检测的系统方案。

(3) 由于视频信号的背景很不均匀，接触线目标所处的背景随着列车前

行而不断发生变化，因此不能简单的用幅度分割法提取目标，文中应用了微分算子、直方图均衡化、Otsu 算法进行二值化、区域分割、形态学闭运算等多种算法实现了接触线目标图像的有效处理。

(4) 研究了干扰目标排除方法、接触线目标预测和跟踪方法，有效地实现了接触网几何参数的准确计算。

(5) 对检测系统误差产生的原因进行了分析，并提出了相应的补偿方法。

(6) 编写功能模块代码，同时进行了阶段调试与优化。

(7) 进行检测系统的调试与完善。

以开发过程中，本人所做的工作为主线，撰写了本文，主要内容如下：

第一章为绪论，阐述了本课题的背景及其意义，简要介绍了国内外接触网动态检测系统的研究现状和本系统的特点。

在二章中，主要介绍了系统的硬件架构和测量原理。结合我国铁路实际情况，建立了检测系统的数学模型，设计出了系统硬件架构，提出了系统整体解决方案。

第三章，对检测系统的目标图像进行了分析，说明了本文中所采用数字图像技术的理论基础和实际应用。

第四章，从检测系统的角度，分析了影响检测数据有效性的主要因素，并就减少系统误差进行了解析。

第五章，以软件工程思想为指导，按照总体规划，详细设计的方法，分别论述了相关子模块的设计与实现。

最后是结论部分，对本检测系统的特点进行了总结，指出了将来基于图像处理技术的接触网动态检测系统的研究和发展方向。

第 2 章 检测系统架构及测量原理

2.1 检测系统硬件构成

本文设计的硬件系统由两大子系统组成：光学子系统和数据处理子系统。光学子系统包含了两台 Onuris 线阵列高速摄像机，两个主动光源；数据处理子系统由一台工业 PC（文中又称为主机）和一台监视器组成，硬件系统结构如图 2-1 所示。

2.1.1 光学子系统

(1) 线阵摄像机

摄像机应用于测量，关键是：一要从待测物体获得和测量有关的特征信息，使 CCD 光敏面上特征信息和非特征信息的光强有较大的反差，也就是二者在输出信息上有较大的电平差值。二要在待测物尺寸和分辨率确定后，认真考虑 CCD 的选取和光学系统的设计，以期望获得较高的分辨率。

与面阵传感器摄像机相比，线阵传感器摄像机具有图像数据量小、分辨率高、扫描率大等特点。线阵列高速传感器摄像机扫描一次，可立即将扫描结果进行一次视频输出，非常适合对高速移动的被测物体进行快速采样，所以在高速电气化铁路接触网动态检测中备受青睐。

本系统选用了德国 Feith 公司生产的型号为 Onuris—SLIS/2048 线阵高速摄像机，该线阵摄像机系统结构如图 2-2。Onuris—SLIS/2048 传感器摄像机只有一行感光元素，传感器芯片具有 2048 个直线排列的光敏元，主频是 20MH，最大扫描率为 14699H，具有很高的扫描率，适合对高速移动的物体进行测量。Onuris 线阵摄像机通过内置图像采集卡，将视频信号直接转换成数字信号，并且图像预处理等简单费时的工作可以在摄像机的 FPGA 板中实现，图像数据通过 USB2.0 接口传送给数据处理子系统。

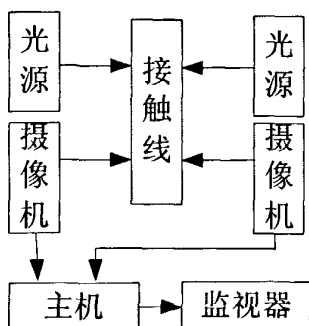


图 2-1 硬件系统结构图

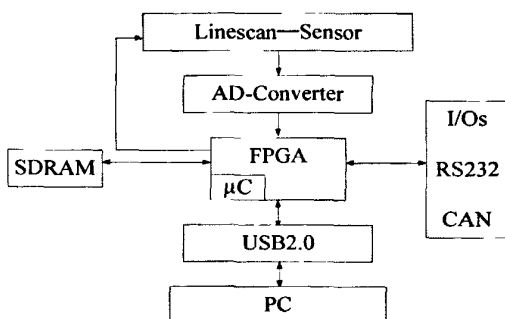


图 2-2 Onuris-SLIS/2048 系统结构图

(2) 主动光源

非接触式检测系统的共同特点是从被测物获得特征信息，从而需要提高目标和背景的对比度。对于被测物体，光源的选择，既要考虑其发射光谱与 CCD 的光谱响应对应，最好是在对应响应峰值附近；其次光源发光要稳定，照明方向要有利于反映待测物的特征信息，且界限分明、正确。光源的光照强度在接触线出现的区域内照度适中，能清晰突出接触线图像的几何轮廓，而且最大限度地分辨背景图像灰度值，降低图像解析系统识别真正接触线的难度。有的可采用漫散光，也有的需要采用平行光照射。

考虑到列车在运行过程中，接触线会偏离滑板的中心位置，所以本系统选用了两台功率为 500W 的聚光灯作为系统的主动光源。聚光灯位于两摄像机外侧，相对车顶中心线对称布置，光源产生的光柱覆盖车顶两台摄像机视觉重叠部分，构成的光幕靶，且在光幕靶的范围内照度均衡。光源的开与关可由用户直接控制，光源的照度由光源控制卡控制，根据背景光的强度，自动调整光源的强度，便于系统适应复杂环境^[27]。

2.1.2 数据处理系统

数据处理系统由一台工业 PC 和检测系统相关处理软件组成，主要完成的任务有：

- (1) 配置摄像机属性，满足系统对摄像机图像拍摄速度、曝光时间的要求。
- (2) 处理摄像机发送过来的视频图像，实时计算出接触线的高度和拉出值，

并判断接触线拉出值和导高是否超限。

(3) 实时监视并记录检测的整个过程，实现检测结果的回放。

2.1.3 检测系统硬件安装

检测系统所用的摄像机和照明光源直接安装在机车顶部，摄像机安装位置关系模型，如图 2-3 所示，摄像机 CCD_1 、 CCD_2 对称安装于转向架上方的车体顶部，与车体等高，通过摄像机窗口取景， G_1 、 G_2 表示摄像机的透镜主点，两摄像机透镜主点之间的距离为 S 。照明光源安装在摄像机两侧，光源产生的光柱一定要覆盖接触线变化区域。摄像机和照明光源两者之间的布置关系如图 2-4。

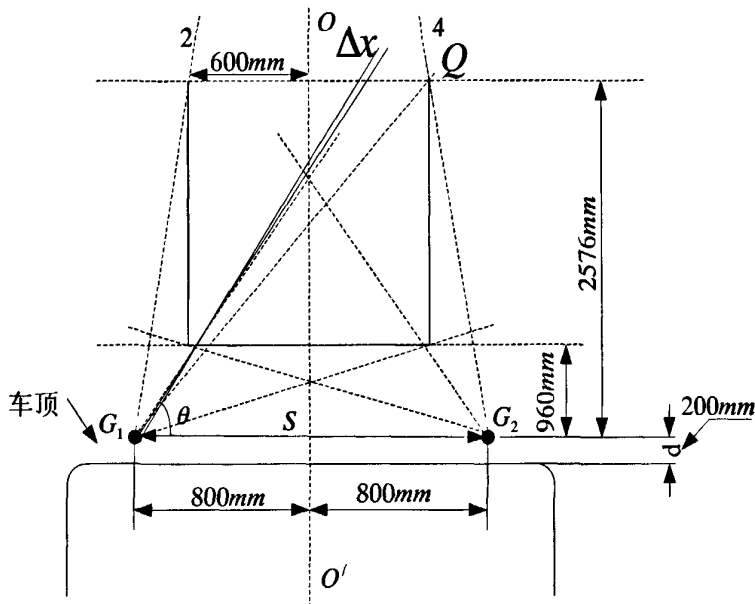


图 2-3 检测系统摄像机安装位置关系图

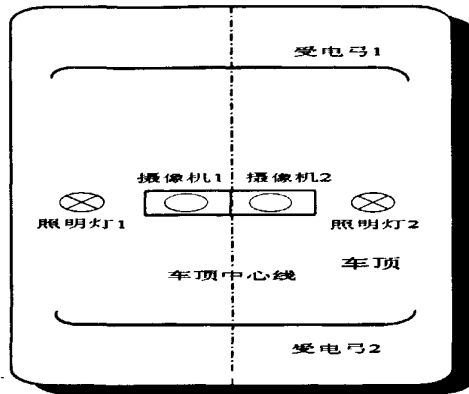


图 2-4 检测设备车顶布置示意图

接触线相对于轨道平面的垂直高度变化范围是 $5370\sim 6450\text{mm}$ ^[1]，相对于车顶的高度范围是 $1370\sim 2450\text{mm}$ ，为了使检测系统的适应性更强，本系统中，接触导线高度检测范围扩展到 $5160\text{mm}\sim 6960\text{mm}$ ；接触线拉出值的变化范围是 $\pm 300\text{mm}$ ，实际上拉出值的可测范围应放宽到 $\pm 600\text{mm}$ 。当接触网在图 2-3 中 2 到 4 区间的视场范围内变化时，接触线应始终处于摄像机的水平视场范围内。在确定摄像机安装位置离轨道平面的垂直高度 H_0 、两摄像机透镜主点之间的距离 S ，和初始安装角 θ_1 和 θ_2 ($\theta_1 = \theta_2$) 时必须满足上述要求。同时还要考虑到尽量提高摄像机的分辨率并减少道旁的景物干扰。

增大摄像机的安装高度 H_0 ，使摄像机靠近接触线，可提高分辨率，但 H_0 过大就不能保证 $\pm 600\text{mm}$ 的拉出值测量范围，为了使接触线和承力索在成像面上的投影不发生交错（便于计算机识别），应尽量增大摄像机距离 S ，但增大 S 势必减小摄像机仰角 θ_1 和 θ_2 ，安装仰角太小，则造成铁道两旁的树木等景物容易进入视场造成干扰，可见各安装参数是相互影响。

现场安装过程时，选择高度为 5585mm 、且位于两摄像机中心线上方的接触线为基准线。摄像机基线离轨道平面的垂直高度为 $H = 4200\text{mm}$ ，离车顶平面的高度为 200mm ，两摄像机基线离基准接触线的垂直高度为 $H' = 1385\text{mm}$ ，摄像机水平

初始位置之间的水平距离为 $S = 1600\text{mm}$, 摄像机焦距调为 12.5mm 。摄像机基本参数采用系统默认设置, 启动检测系统, 不断调整初始安装角, 使接触线在两摄像机中的成像的中心点位于 1024 点, 接触线在两摄像机成像的宽度均相等, 固定此时刻两摄像机的角度位置, 此种情况下的 θ_1, θ_2 可被认为相等。

线阵摄像机的分辨率可定义为一个光敏元的视场宽度, 即图 2-3 所示的 Δx , 在上述安装条件下, 镜头中心点到接触线的最远距离 (图 2-3 中 Q 点) 为:

$$\sqrt{(2760)^2 + \left(\frac{S}{2} + 600\right)^2} = \sqrt{(2760)^2 + (800 + 600)^2} = 3094\text{mm}$$

一个光敏元视场角:

$$\Delta x = 3094 \times \frac{\pi}{180} \times \frac{45}{2048} \approx 1.18(\text{mm})$$

即摄像机的分辨率可达到 1.18mm , 完全能满足系统检测要求。

2.2 系统测量原理

2.2.1 测量内容

本系统主要是实现接触线拉出值和高度基本参数的实时检测。

(1) 拉出值

在电气化铁路上, 为了延长受电弓的使用寿命, 使滑板磨耗均匀, 接触线在线路的直线区段被布置成之字形, 在曲线段被布置成折线的形式, 而且此折线一般与受电弓中心的行迹相割或相切。这种在定位点处接触线距受电弓中心线行迹的距离称为拉出值。在直线区段上, 接触线定位点处相对于线路中心的偏移距离, 称之为之字值。为简便起见, 统称为接触线拉出值^[1]。

为了达到滑板均匀磨耗和延长受电弓寿命的目的, 接触线拉出值不能设置的太小; 相反如果拉出值设置的太大, 在某些情况下, 如遇到最大风时, 接触线在某些部位就会超出受电弓的有效工作长度, 而造成刮弓或钻弓事故。为了避免这些现象的发生, 要经常检测接触线拉出值的大小及其变化。

(2) 接触线高度

接触线正常高度是指悬挂点处，接触线与两轨顶面连接间的垂直距离^[1]。对接触线高度进行测量有两个方面的意义。首先是在静止状态下，测量接触线保持的应有高度，其最高位置不能超过 6450mm，最低位置应满足能通过国家规定的最大超限货物而保持 5370mm^[1]。静态测量首先是为工程和维修单位提供参考数据；其次是在运动状态下，即在列车运行中测量受电弓沿接触线的运动轨迹，为研究接触线悬挂的质量和受电弓的性能以及受电状态提供分析资料^[1]。

2.2.2 摄像机目标映象

摄像机映象目标的几何光路如图 2-5 所示，2048 个象元上对应最大的信号象点。根据透镜成像原理，目标物 AB 进入视场角后，在焦平面线阵形成第 N_1 个象元到第 N_2 个象元上映象。AB 目标映象有两个表现特征：一个是位置特点 P_1 ，一个是宽度特征 ΔN ， $\Delta N = N_2 - N_1$ 。所以，进入视场角的目标物必将有唯一对应的对应特征。

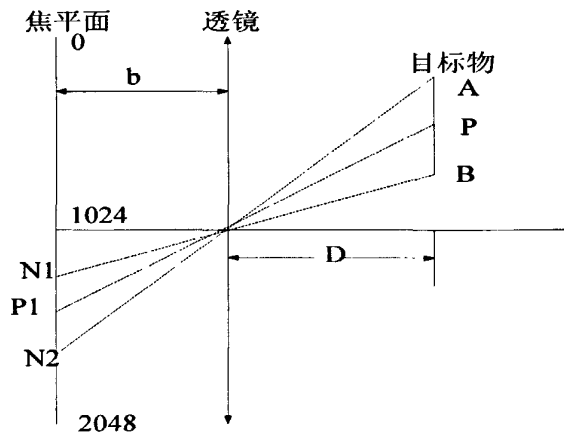


图 2-5 摄像机映射目标几何光学图

2.2.3 测量原理

检测系统测量接触导线拉出值和高度的光路几何关系,如图 2-6 所示。摄像机 C_1 、 C_2 对称安装于转向架上方车体的顶部,两摄像机与车底等高。 G_1 、 G_2 表示摄像机的透镜的中心点(透镜主点), G_1O 、 G_2O 为透镜主光轴。 $|G_1G_2|$ 为两摄像机距离, $|G_1G_2|=S$; G_1 (或 G_2) 到轨道平面的垂直高度定义为摄像机高度 H_0 ; $\angle OG_1G_2$ 、 $\angle OG_2G_1$ 定义为摄像机仰角 θ ,且 $\angle OG_1G_2 = \angle OG_2G_1$, ΔG_1OG_2 所在平面通过转向架中心线,车体中心线 OO' 通过线路中心。

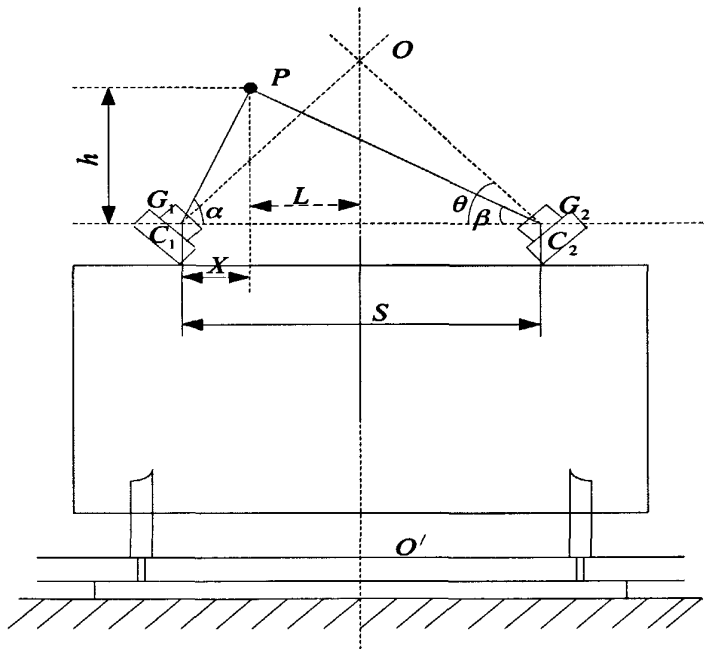


图 2-6 摄像机光路几何关系图

图 2-6 中 P 点代表接触线, P 点到 OO' 的距离定义为该点的拉出值 L , P 点到两摄像机中心线的距离为 h 。由 ΔG_1OG_2 中可知

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{x}, \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{h}{s-x}$$

$$\therefore x = \frac{s * \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta};$$

$$h = \frac{s * \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} \quad (2-1)$$

从而接触线拉出值为:

$$L = \frac{s}{2} - \frac{s * \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} \quad (2-2)$$

接触线高度:

$$H = H_0 + h = H_0 + \frac{s * \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} \quad (2-3)$$

由图 2-6 可知: $\alpha = \theta + \angle OG_1P$, $\beta = \theta - \angle OG_2P$, 为了能够更清晰表达, 将图 2-6 的光学成像部分等效为图 2-7。

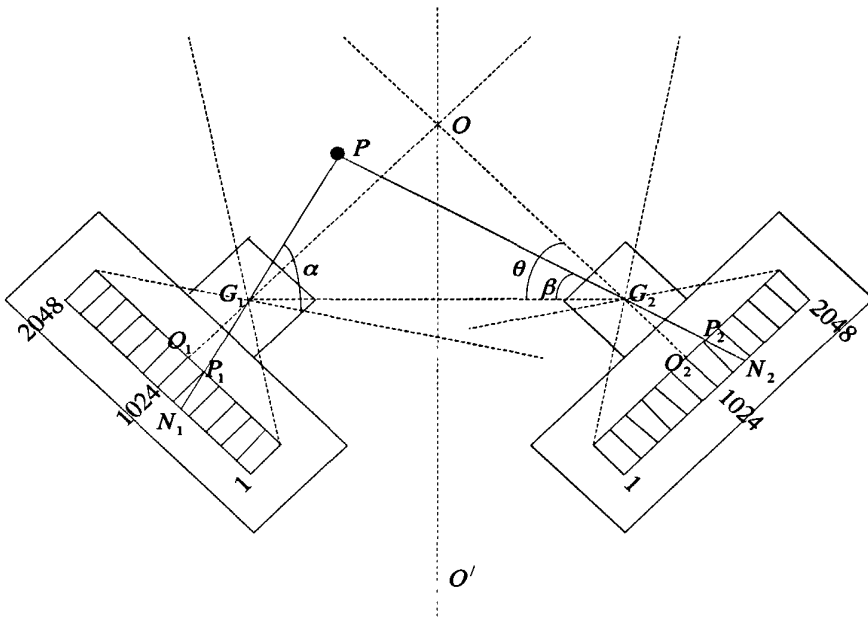


图 2-7 光学成像部分等效图

由图 2-7 可知: $\angle OG_1P = \angle O_1G_1P_1$ 。在 $\Delta O_1G_1P_1$ 中, $tg\angle O_1G_1P_1 = \frac{O_1P_1}{O_1G_1}$, 其中 O_1G_1

摄像机透镜的象距, 可用 b 表示, 由几何光学知识可知, 当物距调定后象距 b 是常数。

$O_1P_1 = (1024 - N_1)\delta$ 。 δ 是光敏宽度 ($7\mu m$), N_1 是 P 点在摄像机 C_1 中的时钟脉冲计数值。所以有:

$$\begin{aligned} tg\angle O_1G_1P_1 &= \frac{\delta}{b}(1024 - N_1) \\ \angle O_1G_1P_1 &= arctg\left[\frac{\delta}{b}(1024 - N_1)\right] \\ \alpha &= \theta + arctg\left[\frac{\delta}{b}(1024 - N_1)\right] \end{aligned} \quad (2-4)$$

当 $\alpha < \theta$ 时, $N_1 > 1024$, 此时

$$\begin{aligned} \alpha &= \theta - arctg\left[\frac{\delta}{b}(N_1 - 1024)\right] \\ &= \theta + arctg\left[\frac{\delta}{b}(1024 - N_1)\right] \end{aligned} \quad (2-5)$$

从而, 在整个视场内均有:

$$tg\alpha = \frac{btg\theta + \delta(1024 - N_1)}{b - \delta(1024 - N_1)tg\theta} \quad (2-6)$$

对于摄像机 C_2 , 同理可得:

$$tg\beta = \frac{btg\theta + \delta(1024 - N_2)}{b - \delta(1024 - N_2)tg\theta} \quad (2-7)$$

在式 (2-6)、(2-7) 中, 仅 N_1 、 N_2 是变量, 其取值范围是 1~2048, 实际测量时, 根据 P 点在两摄像机中的数据时钟计数值 N_1 和 N_2 便可求得 $tg\alpha$ 、 $tg\beta$, 再

根据式 (2-2)、(2-3) 便可计算出接触线 P 点处的拉出值和高度。

2.3 初始安装角整定

由 2.2 节可知, 在计算接触线高度和拉出值时, 两线阵摄像机初始安装角 θ_1 和 θ_2 相等, 均用 θ 表示, θ 的大小为已知量。所以在摄像机安装完毕后, 必须通过建立相关数学模型, 准确计算出安装角度 θ 值。

由现场安装时, 接触线在左右两摄像机中成像的中心点均为 1024 点处, 接触线到两摄像机中心线的高度 $H' = 1385\text{mm}$, 检测系统计算出的接触线到摄像机之间基线的高度用 h 表示。由式 (2-1)、(2-4)、(2-5)、(2-6)、(2-7), 建立接触线到摄像机基线的垂直高度 h 和初始安装角度 θ 之间的函数关系, $h = f(\theta)$ 。假定两摄像机初始安装角 $\theta_0 = 60^\circ$, 应用迭代法, 准确计算出初始安装角度 θ 。根据工程实践, 当 h 满足 $|H' - h| \leq 3\text{mm}$ 时的角度值, 即可认为是所求的摄像机初始角度值。

接触线在两摄像机中所成的图像, 像素点总数均为 35。取步长 $\Delta\theta = 0.01^\circ$, 迭代运算的初值 $\theta_0 = 60^\circ$, 求出使 h 满足 $|H' - h| \leq 3\text{mm}$ 时的角度值 θ , 迭代算法流程如图 2-8 所示。经计算, 当 $\theta = 60^\circ$ 时, h 满足 $|H' - h| \leq 3\text{mm}$, 故可认为本系统中两摄像机初始安装角为 60° 。

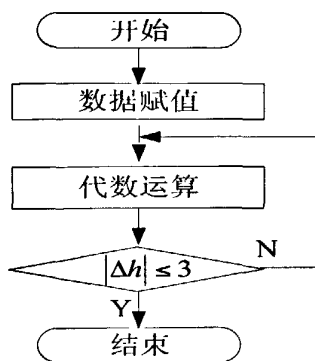


图 2-8 初始安装角整定

第 3 章 数字图像处理

数字图像处理包括底层视觉图像预处理，图像分割与中层视觉处理，图像理解。底层视觉图像预处理一般是指像素点级运算，如图像增强、图像滤波等；图像分割与中层视觉处理则是通过对图像进行分割和特征提取，把像素点级的图像变换为较为简单的非图形方式的描述，提供给高层图像理解层。图像理解层对经过图像处理得来的数据进行分析与综合，得到人们期待的结果作为系统的输出，图像处理结果的好坏将直接影响后继的高层理解与决断。

动态检测系统所接收的原始图像中，除了包含接触线目标信息，还有许多其它的干扰目标。只有对原始图像进行相应的处理，才能准确地分析出接触线目标图像起始点和终止点，确定接触线目标图像宽度，依据所得到的接触线图像信息，根据三角测量法相关原理，计算出接触导线高度和拉出值。本文中的图像处理过程分为以下几步：数字图像微分处理、图像分割、形态学闭运算、接触线目标的预测和跟踪、接触导线几何参数计算，处理过程如图 3-1 所示。

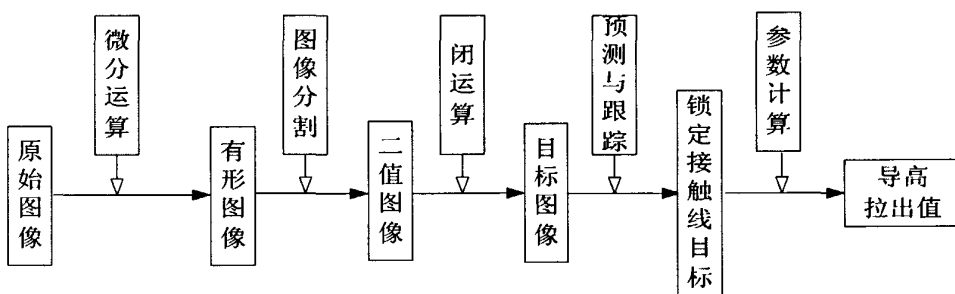


图 3-1 图像处理流程图

3.1 图像微分处理

检测系统工作背景、光学环境都比较复杂，摄像机产生的视频信号的背景很不均匀，如图 3-2 所示。如果简单地用幅值处理方法直接对图像数据进行处理，难于将目标从背景中分离出来。

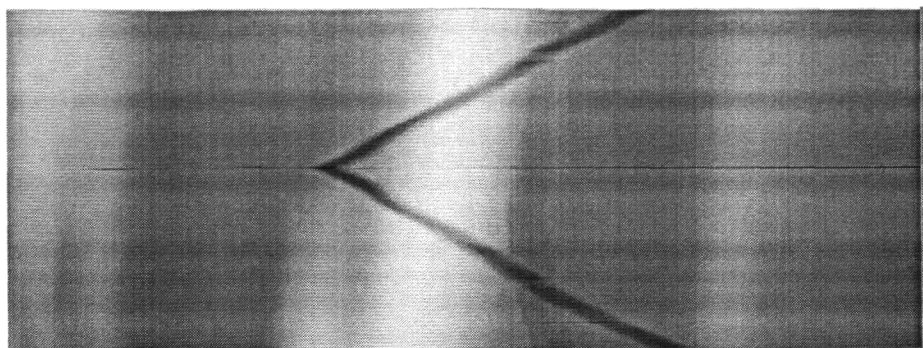


图 3-2 原始图像

检测系统摄像机采样频率比较高，相邻采样点之间的距离比较短。就当前帧图像数据而言，同一坐标下相邻前后帧图像中的背景像素点灰度值有比较大的相关性，而目标（或疑似目标）图像边缘点相对于前（或后）点灰度值，则会有比较的变化。因此可采用微分法消除背景不均匀的影响，同时微分还增强了目标图像边缘轮廓，便于图像的后续处理。

所谓边缘是指其周围像素灰度值有跳跃变化的那些像素点的集合^[10]。图像边缘是图像最基本的特征，边缘广泛地存在于物体与背景之间、物体与物体之间、基元与基元之间，是进行图像分割所依赖的重要特征^[11]，通过对图像进行微分卷积模板运算，可实现图像边缘的检测^[10]。

3.1.1 梯度算子

图像中的一阶导数用梯度计算^[12]。一副数字图像的一阶导数是基于各种二维梯度的近似值。图像 $f(x,y)$ 在位置 (x,y) 的梯度定义为下列向量：

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

计算图像的梯度要基于在每一个像素位置都得到了偏导数 $\partial f / \partial x$ 和 $\partial f / \partial y$ 。

令表 3-1 中显示的 3×3 大小的区域表示图像邻域中的灰度级, 得到 z_5 点处一阶偏导数的最简单方法之一是使用交叉梯度算子:

表 3-1 图像邻域中的灰度级

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

$$G_x = (z_9 - z_5) \quad (3-2)$$

$$G_y = (z_8 - z_6) \quad (3-3)$$

由式(3-2)、(3-3)可知, 2×2 大小的模板由于没有清楚的中心点, 所以很难使用。使用 3×3 大小的模板的方法得到 z_5 点处一阶偏导数的方法由下式给出:

$$G_x = (z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3) \quad (3-4)$$

和

$$G_y = (z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7) \quad (3-5)$$

在这组公式中, 3×3 大小图像区域第 1 行和第 3 行间的差近似于 x 方向上的导数, 第 3 列和第 1 列之差近似于 y 方向上的导数。此算子即为 Prewitt 算子, 如表 3-2 所示, 用矩阵表示即为:

表 3-2 Prewitt 算子

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(a) G_x 代表水平梯度

(b) G_y 代表垂直梯度

将上述两个公式中的中心系数改为权值 2:

$$G_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (3-6)$$

和

$$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (3-7)$$

权值 2 用于通过增加中心点的重要性而实现某种程度的平滑效果, 此种算子为 Sobel 算子, 如表 3-3 所示, 用矩阵表示即为:

表 3-3 Sobel 算子模板

$$G_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array} \quad G_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

(a) G_x 代表水平梯度

(b) G_y 代表垂直梯度

本文中应用 Sobel 算子消除背景不均匀的影响, 还实现了目标图像的边缘检测。

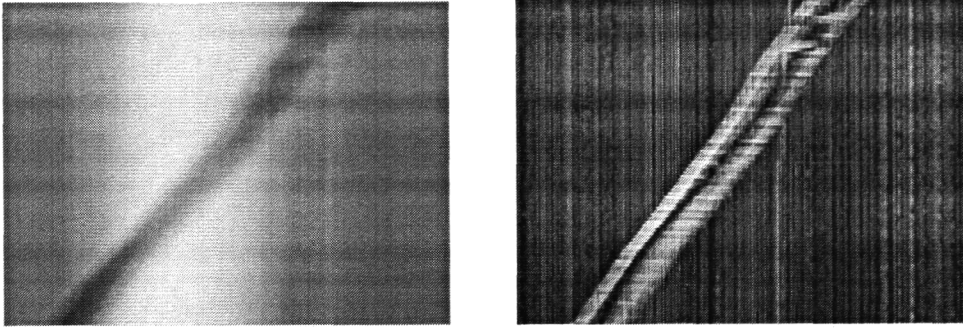
3.1.2 Sobel 算子边缘检测

Sobel 算子的边缘检测, 是在图像空间中, 利用两个方向模板与图像进行卷积来完成的。这两个方向模板一个检测水平边缘, 一个检测垂直边缘。 3×3 模板内的数字称为模板系数, 梯度方向与边缘方向总是正交垂直, Sobel 算子模板如表 3-3 所示。

Sobel 算子是一种一阶微分算子。它利用像素邻近区域的灰度梯度值来计算一个像素的梯度, 然后根据一定的阈值来取舍, 得到图像中的边缘。该算法如下:

(1) 对图像中每个像素, 用下面的公式计算其梯度大小 M , $M = |G_x| + |G_y|$, 其中 G_x 与 G_y 是用表 3-3 中的卷积模板来计算。

(2) 根据阈值和像素的灰度作取舍, 即对像素中的每个像素, 如果其梯度小于阈值 (本文中阈值 $Th = 5$), 则将其灰度值设为零。检测结果如图 3-3 (b) 所示。



(a) 变换前的原始图像

(b) 变换后的图像

图 3-3 Sobel 算子边缘检测结果

3.1.3 Sobel 算法的改进

图像的边缘有许多方向。除了水平方向和垂直方向以外，还有其他的六个边缘方向，如图 3-4 所示，为方便表述，对边缘进行编号。

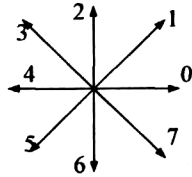


图 3-4 Sobel 算子改进图

改进后的 Sobel 算子模板如表 3-4 所示。

表 3-4 改进后的 Sobel 算子模板

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(a) 0 边缘

-2	-1	0
-1	0	1
0	1	2

(b) 1 边缘方向

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(c) 2 边缘方向

0	1	2
-1	0	1
-2	-1	0

(d) 3 边缘方向

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(d) 边缘方向

2	1	0
1	0	-1
0	-1	-2

(f) 边缘方向

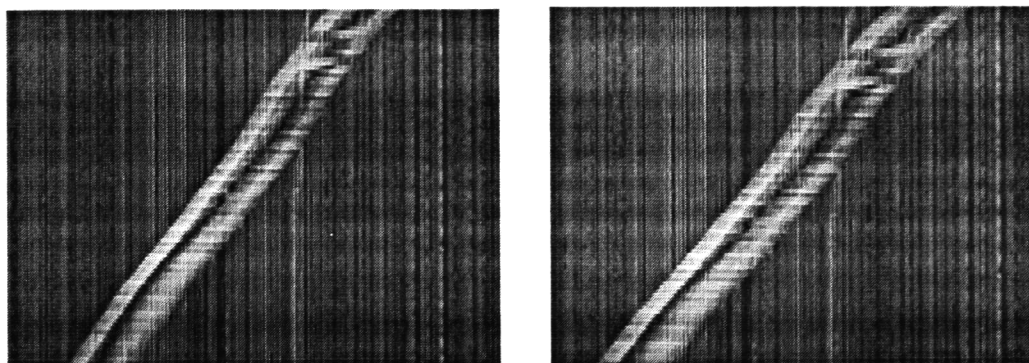
1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

(g) 边缘方向

0	-1	-2
1	0	-1
2	1	0

(h) 边缘方向

经过多方向 Sobel 变换后图像如图 3-5 (b)，接触线轮廓，更加的突出、清晰，便于图像的后续处理。



(a) 未改进的 Sobel 算子检测结果

(b) 改进后的 Sobel 算子检测结果

图 3-5 多方向 Sobel 边缘检测结果

3.1.4 直方图修整

由图 3-5 (b) 可知，图像的亮度范围不足，对比度不理想，如果直接运用此图像进行图像分割，难于成功。对于图像的亮度范围不足或非线性使图像的对比度不是很理想，可用像素幅度重新分配的方法来改善图像的对比度。

为了研究方便，一般先将直方图归一化，即让原图像灰度范围 $[Z_1, Z_k]$ ，归一化为 $[0,1]$ 。设其中任一灰度级 Z 归一化为 r ，变换后的图像任一灰度级 Z ，归一化为 s ，显然 r, s 应当满足：

$$0 \leq r \leq 1, \quad 0 \leq s \leq 1$$

直方图修整就是对下列公式的计算过程：

$$s = T(r) \quad \text{或} \quad r = T^{-1}(s)$$

式中 $T(r)$ 为变换函数，必须满足下列两个条件：

- (1) $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 区域内是单值函数，且单调递增。

(2) $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 区域内满足 $0 \leq T(r) \leq 1$ 。

假定用 $P_r(r)$ 和 $P_s(s)$ 分别表示原图像和变换后图像的灰度级概率密度函数, 根据概率论的知识, 在已知 $P_r(r)$ 和 $T(r)$ 时, 且 $T^{-1}(s)$ 也是单调增长, 则 $P_s(s)$ 可由下式求出:

$$P_s(s) = P_r(r) \frac{d_r}{d_s} = T^{-1}(s) \quad (3-8)$$

直方图修整法中最常用的一种方法就是直方图均衡化, 也就是经过变换后, 使图像的熵尽可能大, 图像中获得尽可能多的信息量^[4]。对直方图进行均衡化意味着 $P_s(s) = 1, s \in [0,1]$, 由公式 (3-8) 可得:

$$ds = \frac{P_r(r)dr}{P_s(s)} = \frac{P_r(r)}{1} = P_r(r)dr \quad (3-9)$$

从而

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(w)dw \quad (3-10)$$

对于数字图像而言, 需引出离散形式的公式:

$$P_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad \begin{cases} 0 \leq T_k \leq 1 \\ k = 0, 1, K, L-1 \end{cases} \quad (3-11)$$

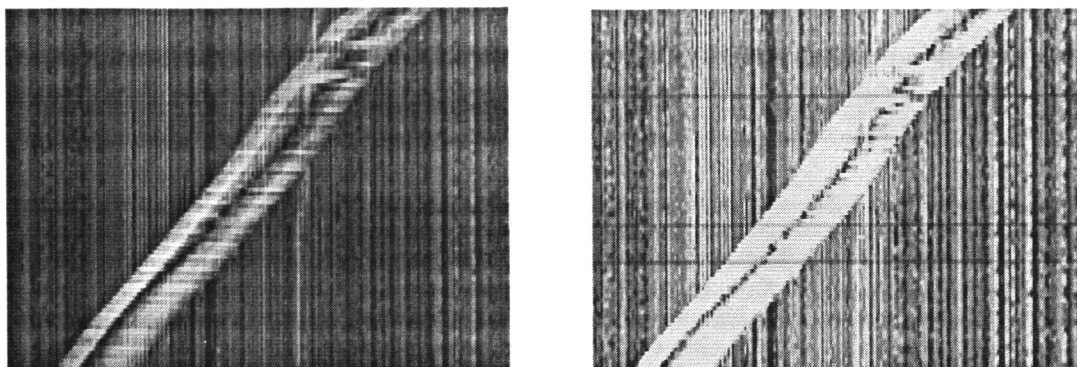
式中 L 是图像灰度级数, $P_r(r_k)$ 是第 k 个灰度级数出现的概率, n_k 是图像中第 k 个灰度级的像素数, n 是图像总像素数。

为了进行直方图的均衡化处理, 根据式 (3-9) 和式 (3-10) 可求得变换函数

$$S_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k P_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad \begin{cases} 0 \leq T_k \leq 1 \\ k = 0, 1, K, L-1 \end{cases} \quad (3-12)$$

由此可见灰度直方图均衡化实现图像处理的算法的核心内容包含下面两部分:

- 计算变换前图像各灰度值的计数, 即得到直方图。
- 根据式 (3-12) 求得变换后图像各灰度级对应的新灰度级即可得到各像素的灰度值。图 3-6 (b) 为经过直方图修整后的图像。



(a) 变换前的图像

(b) 变换后的图像

图 3-6 直方图修整

3.2 图像分割

3.2.1 图像分割简述

图像分割是将图像分成一些有意义的区域，然后对这些区域进行描述，相当于提取出某些目标区域图像的特征，判断图像中是否有感兴趣的目标。图像分割的基础是像素间的相似性和跳变性。从总体上说，图像分割就是把图像分成若干有意义的区域的处理技术，这些区域互不交叠，每一个区域内部的某种特性或特征相同或接近，而不同区域间的图像特征有明显差别。区域内是一个所有像素都有相邻或相接触像素的集合，是像素的连通集。

图像分割的度量准则不是唯一的，它与应用场景、应用目的有关，用于图像分割的场景图像特征信息有亮度、色彩、纹理、结构、频谱、运动、形状、位置、梯度和模型等。按算法分类，图像分割可分为阈值法、界限检测法、匹配法、跟踪法等。通常情况下，利用目标区域和背景区域在灰度方面的差异，也即是利用阈值法，实现图像的分割。

阈值 T ， $T = T[x, p(x), f(x)]$ ，这里 $f(x)$ 是点 x 的灰度级， $p(x)$ 表示这个点的局部性质——以 x 为中心的领域的平均灰度级。经阈值 T 处理后的图像 $g(x)$

定义为:

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

3.2.2 阈值的选取

分割阈值选择的准确性直接影响侵害的精度和图像描述分析的正确性^[10]。阈值选得太高,容易把大量的目标判为背景,定得太低,又会把大量的背景判为目标。一般采用先验知识确定阈值,或者利用直方图特征和统计判决方法确定灰度分割阈值,上述方法,比较适应背景基本不变的情况。本文中,所研究的图像的背景则是处于变化多端之中,因此本文采用了模式识别中最大类间方差准则确定分割门限。

由 Otsu 于 1978 年提出的最大类间方差法,是一种引起较多关注的一种自适应阈值选取方法,其基本原理是在判断分析最小二乘原理的基础上推导出来的,将图像中像素的灰度级按阈值划分为两类,两类间的方差越大,表明图像分割效果越好,所以用类间方差作为准则函数,阈值选择在类间方差最大处。

设图像 f 中,灰度级为 i 的像素的数目是 n_i ,则总像素数目为:

$$N = \sum_{i=0}^L n_i \quad (3-13)$$

各灰度出现的概率为:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3-14)$$

假设灰度级 k 为阈值,将图像分为两个类,灰度为 $0 \sim k$ 的像素和灰度为 $k+1 \sim L$ 的像素分别属于类 A 和 B,类 A 和 B 的概率分别为:

$$p_A = \sum_{i=1}^k p_i \quad (3-15)$$

$$p_B = \sum_{i=k+1}^L p_i \quad (3-16)$$

类 A 和 B 的平均灰度分别为：

$$\omega_A = \frac{1}{p_A} \sum_{i=0}^k i * p_i \quad (3-17)$$

$$\omega_B = \frac{1}{p_B} \sum_{i=k+1}^L i * p_i \quad (3-18)$$

全图的平均灰度 ω_0 为：

$$\omega_0 = \sum i * p_i = \omega_A p_A + \omega_B p_B \quad (3-19)$$

A、B 两类的类间方差为：

$$\sigma^2 = p_A (\omega_A - \omega_0)^2 + p_B (\omega_B - \omega_0)^2 \quad (3-20)$$

按照最大类间方差的准则，从 1 到 L 改变 k ，并计算类间方差，使式(3-20)最大的 k 即是区域分割的阈值。

确定了图像分割阈值，即可对原图像进行二值化处理。如果原图像像素点灰度值小于或等于阈值 k ，则将其灰度值设为 0，否则该点灰度值设为 255。

$$f(x, y) = \begin{cases} 255 & g(x, y) > k \\ 0 & g(x, y) \leq k \end{cases}$$

3.2.3 阈值分割

通过 Otsu 算法，求出图像分割阈值 T 。设原图像像素点灰度级 $f(x)$ ，二值

化后图像像素点灰度级为 $g(x)$ ，则有：
$$g(x) = \begin{cases} 255 & f(x) > T \\ 0 & f(x) \leq T \end{cases}$$
。运算结果如

图 3-7 (b) 所示。

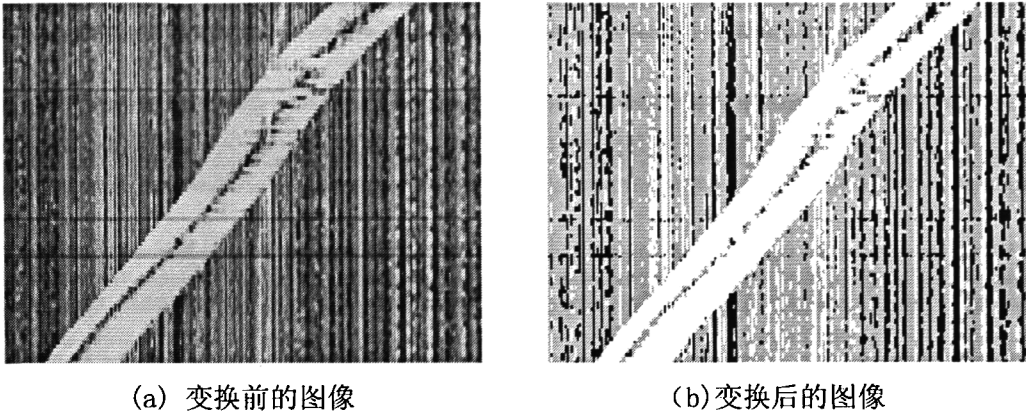


图 3-7 阈值分割后的二值图像

3.2.4 区域分割

二值化后的图像，零碎干扰因素比较多，这些小干扰因素，内部尺寸比较小，彼此之间还不连续。为了消除这些干扰因素的影响，本文中，采用了基于区域的图像分割法再次对图像进行分割。

(1) 基本公式

令 R 表示整幅图像区域，可以将分割看做成 R 划分为 n 个子区域 $R_1, R_2, \dots,$

R_n 的过程：

$$(a) \bigcup_{i=1}^n R_i = R。$$

$$(b) R_i \text{ 是一个连通的区域, } i=1, 2, \dots, n。$$

$$(c) R_i \cap R_j = \phi, \text{ 对所有的 } i \text{ 和 } j, i \neq j。$$

$$(d) P(R_i) = \text{TRUE}, \text{ 对于 } i=1, 2, \dots, n。$$

$$(e) P(R_i \cup R_j) = \text{FALSE}, \text{ 对于 } i \neq j。$$

$P(R_i)$ 是定义在集合 R_i 点上的逻辑谓词， ϕ 是空集。

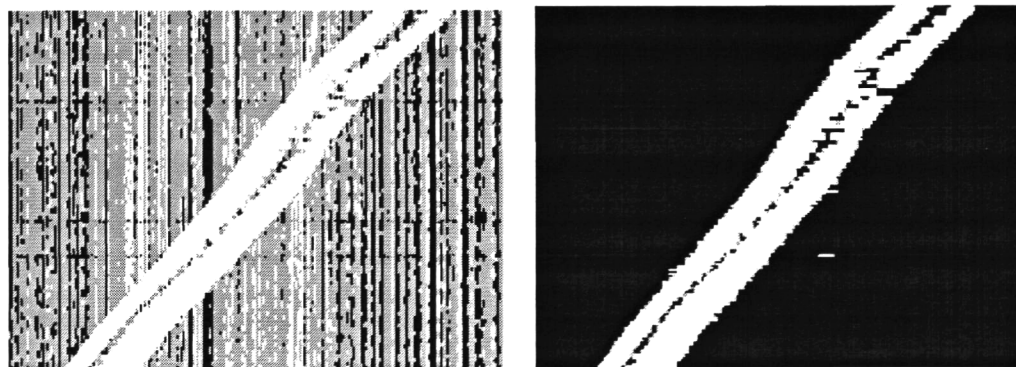
条件 (a) 说明分割必需是完全的；即，每个像素必须属于一个区域。条件 (b)

要求区域中的点必须与某个预定义的准则相联系。条件(c)说明不同区域必须是不相交。条件(d)涉及在分割区域内的像素必须满足的性质—例如如果所有 R_i 内的像素有相同的灰度级,则 $P(R_i)=\text{TRUE}$ 。最后,条件(e)说明区域 R_i 和 R_j 对于谓词 P 是不同的。

(2) 区域生长

区域生长是一种根据事前定义的准则将像素或子区域聚合成更大区域的过程。基本方法是以一组“种子”点开始将与种子性质相似(诸如灰度级或颜色的特定范围)的相邻像素附加到生长区域的每一个种子上。

此处要处理的图像是二值图像,选取灰度值为 255 像素点为种子点,具有相同灰度级的相邻像素点组成一个区域,当此区域宽度大于前一帧搜索窗内接触线目标宽度的 $\frac{1}{4}$,小于其宽度的 1.5 倍时,该区域作为疑似目标而被保留,否则将此区域作为背景处理,相应像素点灰度值置为 0。图 3-8 (b)为经过区域分割后的结果图像。



(a) 变换前的图像

(b) 变换后的图像

图 3-8 区域分割结果

3.2.5 图像闭运算

经过上述算法处理过的图像,虽然有效地消除了视频背景的影响,但是接触线目标图像也发生了改变,接触线图像由连续,变得不连续了。显然,必须

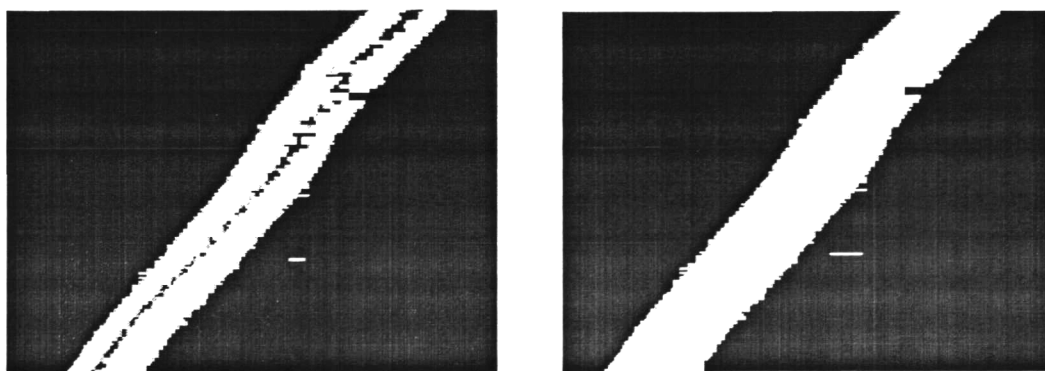
将断裂的目标图像重新链接，同时又不能允许接触线目标图像边缘轮廓的变化，文中对图像实行形态学闭运算来实现此目标。

闭运算是图像数学形态学运算中的一种图像运算方法。数学形态学摒弃了传统的数值建模及分析方法，而从集合的角度来刻画和分析图像，这就意味着它的运算由集合运算来定义，所有的图像必须以合理的方式转换为集合^[15]。在图像处理数学形态学可以实现描述图像各种几何参数和特征的目的^[14]。

闭运算是先对图像进行膨胀运算，然后接着对图像实行腐蚀运算，能实现平滑图像轮廓，其作用效果一般是融合窄的缺口和细长的弯口，去掉小洞填补轮廓上的缝隙，而总的位置和形状不变。闭运算的运算符为 \bullet ， A 用 B 来作闭运算写作 $A \bullet B$ ，其定义为： $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$ 。 $A \oplus B$ 为图像膨胀运算，再通过结构元素 B 对图像膨胀运算后运行结果进行腐蚀运算。

(1) 图像膨胀

膨胀的运算符为 \oplus ， A 用 B 来膨胀写作 $A \oplus B$ ，其定义为： $A \oplus B = \{a | B_a \uparrow A\}$ ，也就是把结构元素 B 平移 a 后得到 B_a ，若 B_a 击中 A ，记下这个 a 点。所有满足上述条件的 a 点组成的集合称作 A 被 B 膨胀的结果。此处结构元素 B 定义为水平方向，结构元素的宽度为前一帧搜索窗内接触线目标宽度的 $\frac{1}{3}$ ，结构原点位于其中心点， A 为图像集合，接触线目标经过膨胀运算后的结果，如图 3-9 (b)所示。



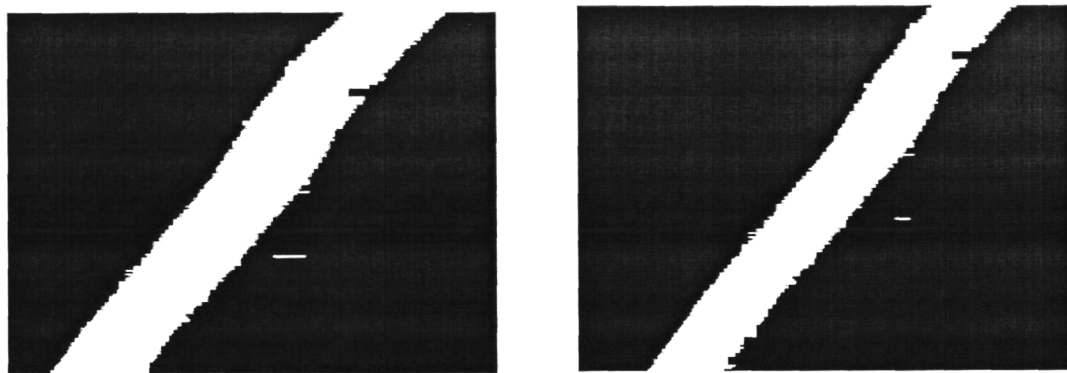
(a) 变换前的图像

(b) 变换后的图像

图 3-9 膨胀运算后的接触线图像

(2) 图像腐蚀

腐蚀可以看作膨胀的对偶运算^[10]，腐蚀运算符为 \ominus ， A 用 B 来腐蚀写作 $A \ominus B$ ，其定义为： $A \ominus B = \{a | B_a \subset A\}$ ，即是把结构元素 B 平移 a 后得到 B_a ，若 B_a 包含于 A ，就记下 a 点，所有满足上述条件的 a 点组成的集合称作 A 被 B 腐蚀的结果。用来进行腐蚀运算的结构元素 B ，为水平方向，结构元素的宽度与进行膨胀时的结构元素宽度等长，也为前一帧搜索窗内接触线目标宽度的 $\frac{1}{3}$ ，结构原点位于其原点，腐蚀后的图像如图 3-10(b) 所示。



(a) 变换前的图像

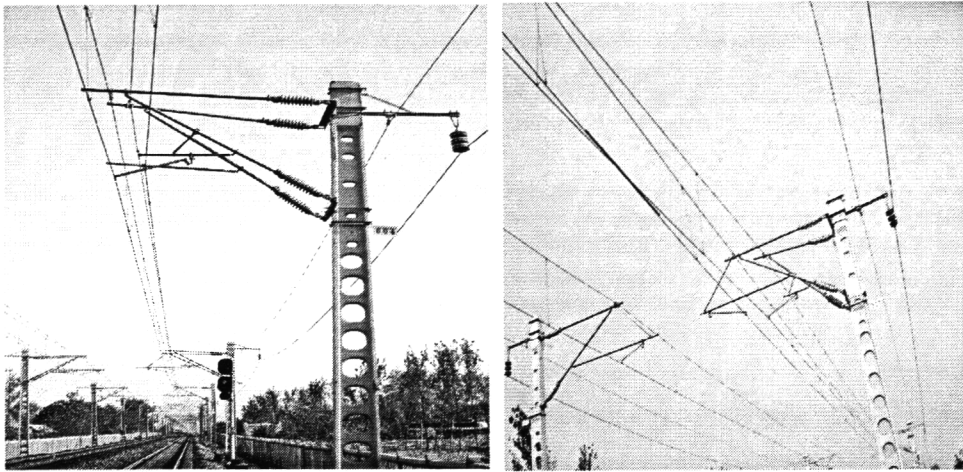
(b) 变换后的图像

图 3-10 闭运算后的接触线图像

3.3 接触线目标的预测与跟踪

3.3.1 接触线目标成像在两摄像机中的匹配

由于摄像机工作背景比较复杂，例如现场遇到线岔、锚段关节等设备时（见图 3-11），多条线索会在一帧图像内同时成像，对获取有效目标几何参数的效率产生很大影响，视频图像，在经过一系列处理之后，可能会存在多个目标，所以进行接触线目标之间的匹配尤为重要，如果接触线目标图像匹配出现错误，将无法得到准确的接触线几何参数值。



(a) 锚段关节

(b) 线岔

图 3-11 典型多线索设备

由于摄像机安装时要求在满足接触线几何参数测量的前提下，尽量减小视场角，避免过多的干扰物出现。实际上，经过处理过的图像，超过两个目标对象的情况并不多，下面就以两个目标点的情况展开讨论。

(1) 两目标均出现在两摄像机主光轴同侧

当两目标均出现在图 3-12 中的 1、3 虚线中间区域，2、4 虚线中间区域时，即可认为两目标均出现摄像机主光轴同侧，目标在摄像机中的成像均位于以中心点 1024 为界的一侧区域内。下面以目标点 P_1 、 P_2 出现在 1、3 虚线中间区域为例， P_1 点在摄像机 C_1 中的映象点是 N_1 ，在摄像机 C_2 中的映象点是 N_2 ， P_2 点在摄像机 C_1 中的映象点是 N_3 ，在摄像机 C_2 中的映象点是 N_4 。 N_1 、 N_3 在 1~1024 范围之内， N_2 、 N_4 在 1024~2048 范围之内。在空间上， P_2 相对 P_1 点而言， P_2 点离中心线 OO' 更远，映象点 N_3 离中心点的距离比 N_1 大，映象点 N_4 离中心点的距离比 N_2 大。根据映象点位置离中心点 1024 处距离的大小，即可

实现目标成像的匹配关系，即一摄像机中离中心点 1024 处距离大的映象点对应另一摄像机中离中心点 1024 处距离大的映象点，其余两映象点匹配。

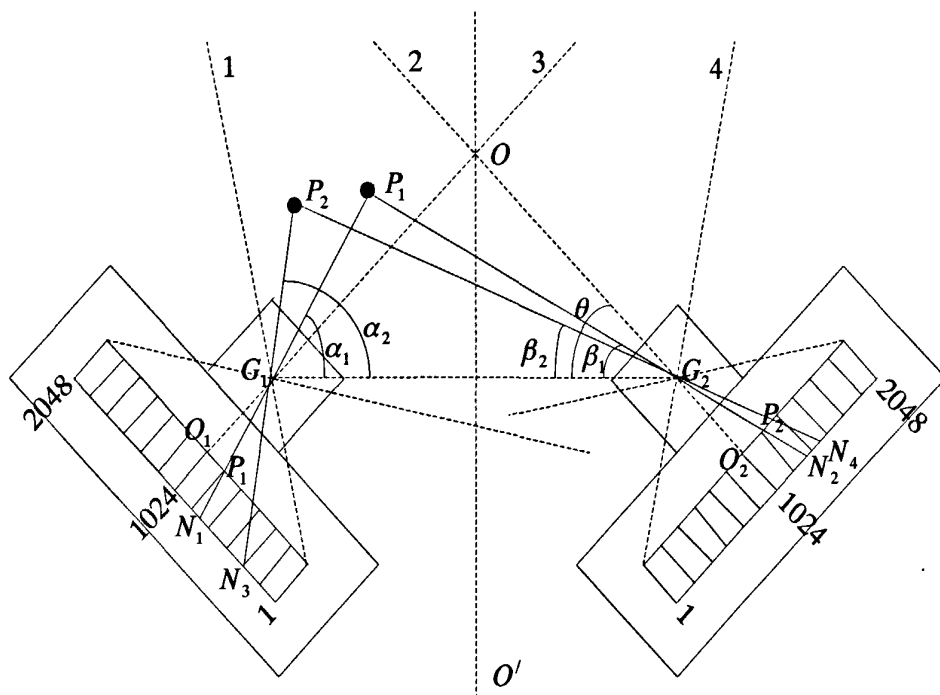


图 3-12 两摄像机主光轴同侧多目标光路等效图

(2) 两目标出现在一摄像机主光轴异侧，另一摄像机主光轴同侧

此种情况两目标分布的区域情况可能是：一目标出现在 1、3 虚线区域，另一目标出现在 2、3、5、6 虚线区域；或者一目标出现在 2、4 虚线区域，另一目标出现在 2、3、5、6 虚线区域内。下面以如图 3-13 所示的情况为例，展开讨论，目标 P_1 、 P_2 映象点分别出现在摄像机 C_1 主光轴的异侧，对于摄像机 C_2 而言， P_1 、 P_2 映象点则是位于主光轴的同侧。在摄像机 C_1 中目标 P_1 的映象点 N_1 落在 1~1024 范围内， P_2 的映象点 N_2 则落在 1024~2048 之间， P_1 、 P_2 在摄像机 C_2 中映象点 N_3 、 N_4 均落在 1024~2048 之间。目标点 P_1 离中心线 OO' 的距离比 P_2

要大, N_2 离中心点 1024 的距离比 N_4 大, 此种情况下的目标成像匹配关系: 首先确定目标在摄像机中的映象点位置关系, 在 1~1024 区域内的映象点对应另一摄像机离中心点远的映象点, 剩余的两映象点匹配。

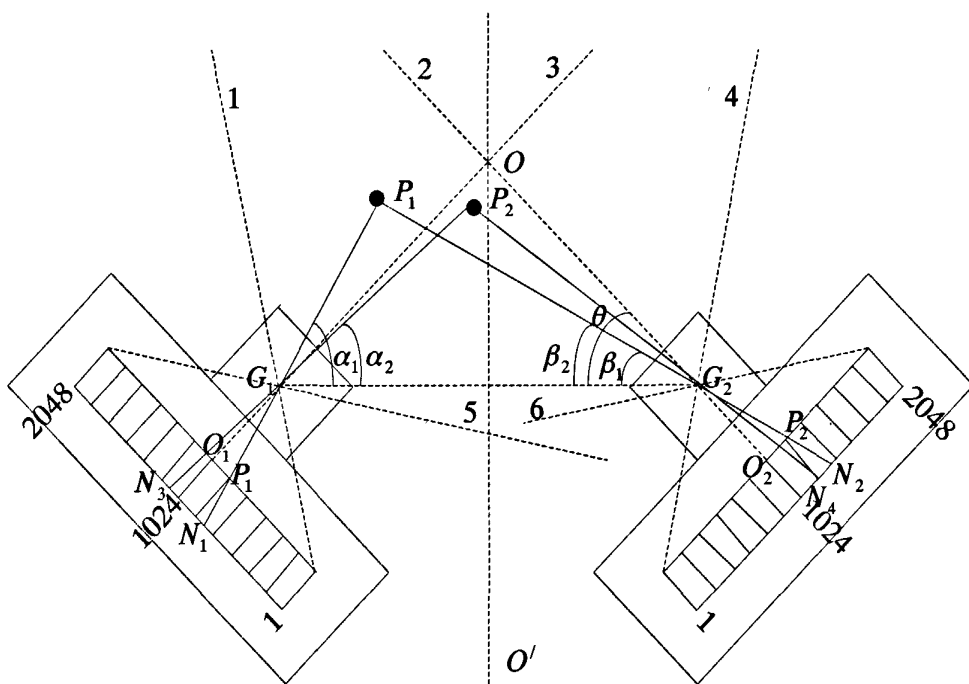


图 3-13

(3) 两目标出现两摄像机主光轴的异侧

目标点 P_1 、 P_2 相对于两摄像机而言, 均是在摄像机主光轴的异侧出现, 如图 3-14 所示。 P_1 在摄像机 C_1 中的映象点 N_1 落在 1~1024 范围内, 在摄像机 C_2 中的映象点 N_2 则在 1024~2048 区间, 目标点 P_2 的映象关系与 P_1 刚好相反。据上述分析, 落在 1~1024 范围内的映象点与另一摄像机中 1024~2048 范围内的映象点匹配。

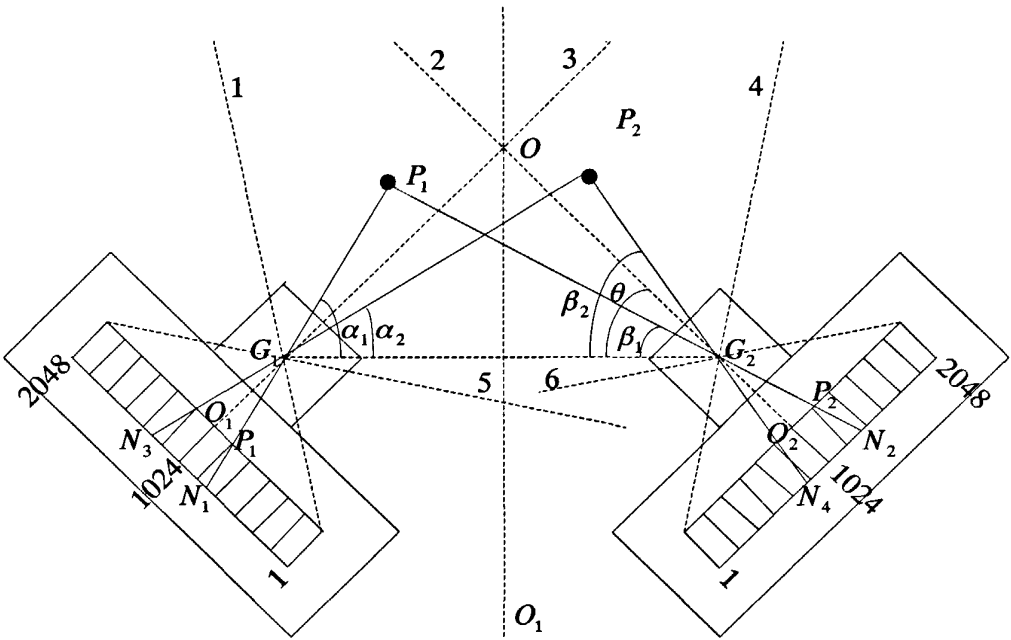


图 3-14 两摄像机主光轴异侧多目标光路等效图

3.3.2 接触线拉出值曲线模型

检测车在运行过程中，沿车体中心线 OO' 画一柱面，在接触线高度上用一垂直平面与柱面相交，交线为车体中心运行轨迹，接触线拉出值就是接触线某点离车体中心的距离，如图 3-15 中的 OC 。

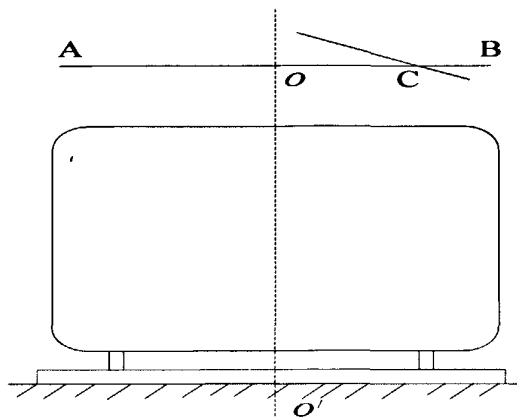


图 3-15 拉出值示意模型图

在直线区段，车体中心轨迹是直线，之字形悬挂接触线的拉出值曲线为三角波，如图 3-16 所示。以车体中心轨迹为横轴，横轴 x 表示车体中心轨迹某点坐标，纵轴 $L(x)$ 表示该点的拉出值， L_A 、 L_B 分别为定位点 A 、 B 的拉出值，所以 AB 跨之间的接触线拉出值曲线方程为：

$$L(x) = L_A + \frac{L_B - L_A}{b - a}(x - a), \quad x \in [a, b] \quad (3-21)$$

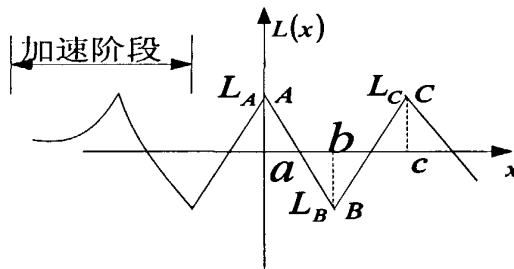


图 3-16 拉出值数学模型

设车速为 v ，则 $x = v * t$ ，此时接触线拉出值曲线方程为：

$$L(t) = \frac{L_B - L_A}{b - a}(v * t - a), \quad t \in \left[\frac{a}{v}, \frac{b}{v} \right] \quad (3-22)$$

当检测车作变速运动时，拉出值相对于时间的变化率 $\frac{dL(t)}{dt} = \frac{L_B - L_A}{b - a} v$ 。

3.3.3 目标识别及跟踪

在初始分离出运动对象后，通过跟踪运动对象的轨迹和轮廓，可以在下一帧中容易地分割出对象。跟踪算法的思想有：把在每一帧中分割出的对象信息根据运动情况投影到下一帧，作为下一帧中运动对象分割的初始信息；或者把当前帧的对象信息与下一帧中提取的粗边沿图像进行匹配，以便确定跟踪的对象；或者根据当前帧的特征合并下一帧分割的各个区域，从而得到跟踪的对象。跟踪法有基于两帧的算法，也有基于多帧的算法，利用较多帧进行跟踪可以降

低噪声对系统的影响。

根据跟踪与检测的先后关系可分为：一是先检测后跟踪，先检测每帧图像上的目标，然后将前后两帧图像上目标进行匹配。二是先跟踪后检测，先对目标下一帧所在帧所在的位置及其状进行预测，然后根据检测结果，来矫正预测值。三是边检测边跟踪，图像序列中目标的检测和跟踪相结合，检测要利用跟踪来提供处理的对象区域，跟踪要利用检测来提供目标状态的观测数据。

在单侧（左侧摄像机或右侧摄像机）图像中，根据图像灰度值的不同，确定目标的数目、每个目标的中心位置及目标的宽度。

设定摄像机像素计数的起点（即计数时的零点）为背离车顶面方向的起始像素点，则目标的中心位置：

$$N_i = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad (3-23)$$

目标宽度：

$$d = n_2 - n_1 \quad (3-24)$$

则相邻两帧图像目标中心位置变化值为：

$$\Delta N(t) = N(t) - N(t-1) \quad (3-25)$$

由以上分析可知，摄像机被监控目标可用三个参数表示，建立一相关目标参数结构体，结构体中的数据成员是 N_i ， d ， $\Delta N(t)$ 参数值，参数表是一个先进现出的队列，结合接触线测量实际情况，参数表只保持最近 5 次结构体参数值。

跟踪搜索接触线目标的基础是锚断内接触线的连续性，每帧图像数据之间相关性较大。因而可以根据前几次图像中目标的变化趋势，预测下一帧图像中目标将出现的位置。

设在 t 时刻目标的中心位置为 $N(t)$ ，由式（3-25）可知在 $t+1$ 时刻目标的预测值为：

$$N(t+1) = N(t) + \Delta N(t+1) \quad (3-26)$$

式中 $\Delta N(t+1)$ 可由前几帧图像中的 $\Delta N(t)$ 来进行估值，根据工程实际情况可知，

离本帧图像越近的 $\Delta N(t)$, 对预测值的影响就越大, 在本文中采用了以下式(3-27)的加权算法对 $\Delta N(t+1)$ 估值。

$$\Delta N(t+1) = \frac{1}{2} \Delta N(t) + \frac{1}{4} \Delta N(t-1) + \frac{1}{8} \Delta N(t-2) \quad (3-27)$$

所以:

$$N(t+1) = N(t) + \frac{1}{2} \Delta N(t) + \frac{1}{4} \Delta N(t-1) + \frac{1}{8} \Delta N(t-2) \quad (3-28)$$

预测值按下式确定搜索窗口:

$$[N(t) - k * d(t), \quad N(t) + k * d(t)] \quad (3-29)$$

窗口宽为 $2 * k * d(t)$, 其中 $d(t)$ 为 t 时刻接触线宽度, k 是与车速有关的经验系数。由于定位点拉出值的变化方向改变, 所以搜索窗口的宽度要取得适当, 否则容易发生预测失误。有关试验数据表明, $k = 1 + \frac{v}{50}$ 比较合适。这种预测法的原理表明, 搜索窗口与摄像机图像中目标值有关, 窗口宽度随车速变化, 所以跟踪可靠性高, 有一定的自适应特性。当在窗口搜索到接触线, 使用接触线的实际参数取代预测值, 计算 $\Delta N(t+1)$, $d(t+1)$, 更新参数表。

锚段关节处, 两对接触线和承力索交替转换, 在跟踪原接触线的同时, 对新出现的目标根据几何关系和变化规律识别非工作支接触线。经历转换跨时放弃原接触线, 需转入对新接触线的跟踪搜索。

第 4 章 检测系统的误差分析

在实际测量中,人们对客观事物认识的局限性、测量器具不准确、测量手段不完善、测量环境条件变化以及测量工作中的失误,都会使测量结果与被测真值之间有一定差异,形成测量误差。误差按性质和来源可分为系统误差、偶然误差和疏失误差。

在误差理论中用准确度来表示系统误差大小的程度。测量结果的准确度是指测量结果 X 与被测真值 A_0 相接近的程度。准确度的高低用误差来衡量。误差可分为绝对误差 E_a 和相对误差 E_r 两种,分别表示为

$$E_a = X - A_0 \quad (4-1)$$

$$E_r = \frac{X - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (4-2)$$

被测真值 A_0 是一个理想的概念,在实际中测量过程中,由于受到各种主观及客观因素的影响,真值往往不可能准确获知。因此,通常采用约定真值 X_0 替代真值进行误差的计算,则 (4-1) 和 (4-2) 式演变为

$$E_a = X - X_0 \quad (4-3)$$

$$E_r = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% \quad (4-4)$$

设接触线实测高度和拉出值分别为 H^* 和 R^* , 约定真值为 H 和 R , 接触线至摄像机中心线平面的距离为 h^* , 约定真值为 h , 安装高度为 h_0 。接触线高度和拉出值的绝对误差分别用 E_{ah} 和 E_{ar} 表示, 相对误差分别用 E_{rh} 和 E_{rr} 表示。则有

$$E_{ah} = H^* - H = h^* - h \quad (4-5)$$

$$E_{ar} = R^* - R \quad (4-6)$$

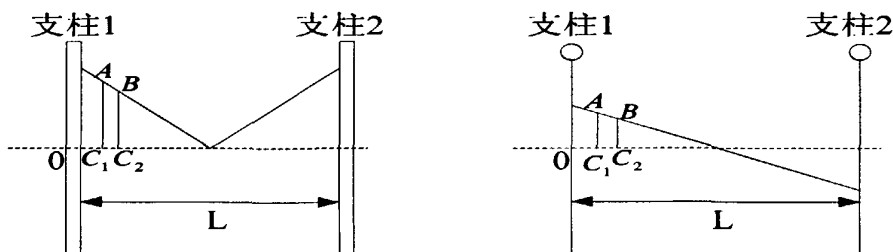
$$E_{rh} = \frac{E_{ah}}{H} = \frac{E_{ah}}{h_0 + h} \quad (4-7)$$

$$E_{rr} = \frac{E_{ar}}{R} \quad (4-8)$$

在实际接触网几何参数检测过程中，系统的测量误差由静态误差和振动误差合成。静态误差是在车体中心线与线路中心一致的情况下，由于对拉出值和高度作间接测量引入的运算误差和设备误差，从引起静态误差的角度上看，影响检测数据有效性的主要因素有以下两个方面：第一，测量过程中采样点位置相异；第二，摄像机在测量过程中，其工作背景造成的影响。震动误差是在运动中测量时，由于振动使车体中心线偏离线路中心造成的，是随机误差。

4.1 两摄像机采样点位置相异引起的误差

列车高速运行时，输入数据处理子系统中供运算的图像数据，可能不是接触线同一位置点的图像信息，而是相距一定距离的不同点图像信息。如图 4-1 所示，摄像机 C_1 将采样点 A 的数据送入数据处理子系统，而摄像机 C_2 则将 B 点的图像数据输入数据处理子系统， A 、 B 两点在摄像机中的成像特征会发生一些改变，此时，应用 A 、 B 映象目标参数，进行接触线几何参数检测，不可避免的产生测量误差。



(a) 接触线高度误差分析图

(b) 接触线拉出值误差分析图

图 4-1 采样点位置相异引起误差分析图

受接触线实际布局的影响，当两摄像机采样点之间的位置差较大时，摄像机 C_2 在 B 点采样时所得到的图像数据，与摄像机 C_2 在 A 点采样时所得到的图像数据相比，接触线目标点在摄像机中成像的起始位置和图像宽度均会发生一些变化。

设摄像机 C_2 目标对象在图像数据中成像位置的偏移量为 Δn ，像素宽度的变化量为 Δw ，式(2-7)中的 N_2 将会发生改变： $N_2' = N_2 + \Delta n + \frac{\Delta w}{2}$ ，则有：

$$\operatorname{tg}\beta' = \frac{b \operatorname{tg}\theta + \delta(1024 - N_2')}{b - \delta(1024 - N_2')} \operatorname{tg}\theta \quad (4-9)$$

接触线拉出值为：

$$R' = \frac{s}{2} - \frac{s * \operatorname{tg}\beta'}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta'} \quad (4-10)$$

接触线高度：

$$H' = H_0 + h' = H_0 + \frac{s * \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta'}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta'} \quad (4-11)$$

接触线拉出值的变化量： $\Delta R = R - R'$ (4-12)

接触线高度的变化量： $\Delta H = H - H'$ (4-13)

实际测量过程中，两摄像机采样点位置相异，表现在两摄像机对接触线采样的时间间隔比较大。以两摄像机视场范围内，且位于车顶中心线右侧接触线为例，分析其误差。假设列车运行速度 $v = 200\text{km/h}$ ，跨距 $L = 50\text{m}$ ， $R = 300\text{mm}$ ， $H = 6000\text{mm}$ ，则不同的延迟时间，产生不同的接触线高度和拉出值误差，如表 4-1 所示。表中 Δt 表示摄像机采样时延， Δx 表示摄像机不同采样点之间的位置距离，

表 4-1 摄像机采样点位置相异引起的误差分析表

Δt (ms)	0	0.1	1	1.3	10	100
Δx (mm)	0	5.556	55.556	72.222	555.556	5555.556
H' (mm)	6000	6000.345	6003.581	6004.644	6035.710	6358.005
R' (mm)	300	299.823	299.533	299.133	293.542	233.333
E_{ah} (mm)	0	0.345	3.581	4.644	35.710	358.005
E_{rh} (%)	0	0.006	0.060	0.077	0.595	5.967
E_{aR} (mm)	0	-0.177	-0.467	-0.867	-6.458	-66.667
E_{rR} (%)	0	-0.059	-0.156	-0.289	-2.153	-22.222

经分析可知, 当延迟 Δt 小于 1.3ms 时, 拉出值和高度的绝对误差均小于 5mm, 相对误差均不超过 0.3%, 此时由摄像机不同步引起的误差可以忽略不计。

在检测系统运行期间, 在实际运行的接触线状况良好的情况下, 检测系统中接触线测量参数经常出现异常时, 就有可能是采样点位置相异引起的。消除此种误差的方法是: 首先清除图像缓冲区内的所有暂存图像数据, 接着重新启动两摄像机, 以便两摄像机处于同步的工作状态, 实现对接触线同一点进行数据采样。

4.2 CCD 摄像机工作环境的影响及分析

在进行接触线几何参数检测时, 由于摄像机视场中可能包含整个接触悬挂的各种部件, 所以接触网系统中的吊弦、承力索、腕臂、中心锚节、定位管、定位器、软硬横跨和桥梁的上部结构等成了检测系统的干扰目标, 从而给整个检测工作带来了很大的干扰, 并且在一定程度上还降低了系统的稳定性。为了有效地保留检测目标的信号, 有必要分析接触网的结构及其各成像部件的特征。

吊弦纵向安装, 对目标成像影响小, 承力索与接触线布局形式相似, 是识别接触线目标的主要干扰因素。承力索表面比较污浊, 底面呈柱状弧形, 对光的反射性较弱, 所以承力索目标成像宽度小且边缘过度平滑; 列车在运行过程中, 由于接触线与受电弓摩擦作用, 磨损面光亮, 发射性能较其它物体高很多,

并且磨耗面边缘几何过度陡峭，在摄像机中成像信号电平较高，所以接触线目标成像边缘明显，斜率大。从尺寸来看，接触线最大宽度相对背景中的腕臂、软硬横跨、桥梁上部结构等几何尺寸较大的干扰目标来说都比较小，只有承力索以接触线相近，但承力索在接触线上方，离摄像机较远，由几何光学可知，照度与距离成反比，所以目标图像信号幅度比较平滑。

在接触网系统的支持部分，能成像的主要有腕臂、定位器、定位管以及软硬横跨，但由于它们大都垂直轨道方向，在接触线方向只是零星出项，对光的反射性能差，并且成像很宽，所以对接触线目标的识别和跟踪可以忽略。

对锚段关节处的目标识别，三跨段关节处，影响的干扰目标除有工作支承力索外，还有非工作支接触线以及承力索；对于四锚段关节还有电分段，结构更复杂，但成像分析与三跨段类似。在线岔的情况和锚段关节处的检测也很相近，都可利用工作支和非工作支的区别来进行目标识别和跟踪。

若检测系统在启动时恰好位于锚段关节处，则成像就可能有工作支和非工作支，在接触悬挂的部件中，工作支接触线离摄像机最近，在锚段关节工作和非工作支交换前一定范围外，可较容易利用获得的目标信息判断出接触线的位置。在接触线工作支和非工作支转换处，由于工作支和非工作支平行且高度相近，无法判断目标接触线，这时可进行锚段关节处的双线检测，即认为两根接触线目标都有效。

4.3 机车振动的影响及分析

4.3.1 车辆运行振动分析

运行中的列车车辆是具有弹簧悬挂装置的多自由度的振动系统，在实际线路上运行时，会产生复杂的振动现象，但振动理论的研究和实践表明，这种复杂的振动是若干基本形式振动的组合结果。车体的振动形式有：沉浮振动、横摆振动、伸缩振动、摇头振动、仰伏振动、侧滚振动等。

安装在机车顶部的检测装置，在正常检测过程中会随车体一起振动，故而收集到的检测数据受到了车辆振动的影响。车辆振动是一个非常复杂的课题，同一辆车，不同的线路等级和线路状态，振动情况不同；同一车辆、同一线路，

不同的运动速度，振动也不一样；不同的车辆情况也不同。所以，车辆振动是一个难以预测的随机变量，在最后的处理必须考虑车辆振动的影响。

经过理论分析和运营实践表明，在影响拉出值的振动横向位移的因素众多因素中，起决定性影响的是车体侧滚振动，其中最为严重的是发生下侧振动，其次才是横向振动。

4.3.2 车辆振动影响的补偿

若接触线的正常工作高度按 5700mm 计算，车体以盘中心为转动中心，则车体即侧滚一个很小的角度，受电弓中心也将随各侧滚方向产生较大的位移。若心盘距轨面按 5000mm 计算。

则车体倾斜 1° 时，受电弓中心水平横向偏移

$$d = 5000 \times \tan 1^\circ \approx 5000 \times 0.17455 = 87.25\text{mm}$$

在车体倾斜 2° 时，受电弓中心水平横向偏移

$$d = 5000 \times \tan 2^\circ \approx 5000 \times 0.03492 = 174.60\text{mm}$$

当车体倾斜 3° 时，受电弓中心水平横向偏移

$$d = 5000 \times \tan 3^\circ \approx 5000 \times 0.05241 = 262.04\text{mm}$$

由上述数据可以看出，由于车辆的侧滚（车体倾斜）形成的受电弓中心水平横向偏移量是很严重的，车辆的侧滚振动应该作为受电弓水平偏移（拉出值）动态补偿的重点。

第 5 章 检测系统软件设计

根据检测过程中的实际运用需要，文中进行了相应的软件设计，主要实现以下功能：

- (1) 在机车运行过程中，实现接触线原始图像的实时显示、图像数据的存储及处理。
- (2) 自动实现接触网几何参数的检测及结果显示。
- (3) 对接触导线高度、拉出值超限等故障进行声音及文字报警提示。
- (4) 准确获取故障点的相关信息。
- (5) 根据用户需求绘出局部或全局接触线高度及拉出值趋势变化图。

5.1 软件设计概述

本检测系统选择 Windows XP 操作系统为检测系统运行平台，Visual C++6.0 作为应用程序的开发工具。利用德国 Feith 公司提供的基于 Onuris 高速摄像机软件开发包，进行相关程序的开发。

Window XP 是 Microsoft 继 Windows 2000 和 Windows Millennium 之后推出的新一代 Windows 操作系统。Windows XP 将 Windows 2000 的众多优点（例如基于标准的安全性、易管理性和可靠性）与 Windows 98 和 Windows Me 的最佳特性（即插即用、易于使用的用户界面以及独具创新的支持服务）完美集成在一起，是一款优秀的 Windows 操作系统产品。

Visual C++6.0 是 Microsoft 公司开发的基于 C/C++ 的可视化集成开发工具，代码执行效率高。随 Visual C++ 一起提供的 Microsoft 基本类库 (Microsoft Foundation Class Library MFC) 为用户提供了 Windows XP 环境下面向对象的程序开发界面，它为用户提供了大量预先编写好的类及支持代码，用于处理标准的 Windows 编程任务。

使用 Visual C++6.0 软件开发环境 AppWizard 向导，生成基本对话框形式的框架，把此框架作为检测系统的基本框架。程序设计过程中，充分利用了面向对象的思想，主要建立了以下一些类：用作摄像机控制的

CSetCameraParameter 类；用来管理图像数据、并作数据缓冲池的 Queue 类；图像处理类 CImageProcess；实现接触线目标处理类 CCwlTarget，接触线几何参数计算类 CCwlParCal。

系统模块主要由摄像机控制模块、图像解析模块、光源控制模块组成。在摄像机控制模块中，主要实现摄像机参数的设置及其工作状态的监控。图像解析模块是整个系统的核心模块，实现原始图像处理、目标图像跟踪、接触线几何参数的检测。光源控制模块，则是根据外界背景光的变化情况，实现光源的自动调节。检测系统应用程序的基本框架如图 5-1 所示，系统图像数据处理总体流程图如图 5-2 所示。

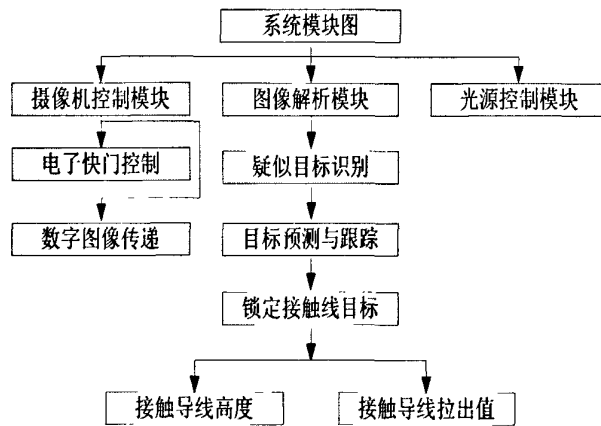


图 5-1 用户软件系统模块图

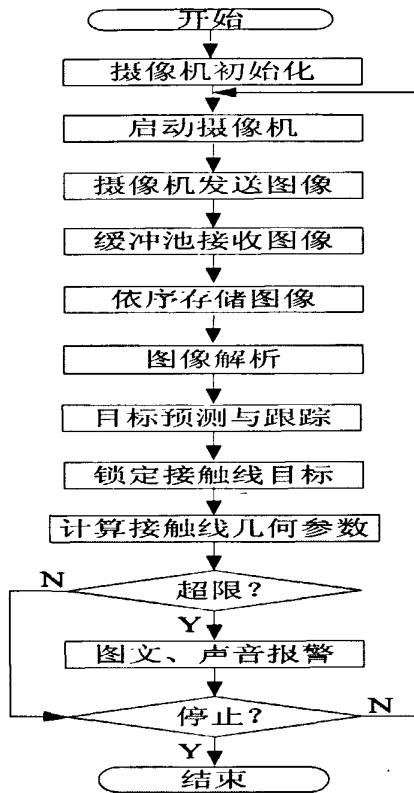


图 5-2 图像数据处理总体流程图

应用程序启动后，系统提示用户设置摄像机运行参数，用户根据机车实际运行情况，设置摄像机运行参数。待摄像机参数设置完毕后，按下启动按钮，系统开始接收摄像机传送来的原始图像数据，原始图像暂存于原始图像缓冲池中，图像处理子模块从原始图像缓冲池中读取图像数据，进行相关的图像处理，实现接触线目标的跟踪；依据系统提供的光学子系统的硬件安装几何关系，按照三角测量法原理，完成接触线几何参数的实时检测，当出现接触线几何参数超限的情况，系统给出声音和图文报警标志。原始图像数据则是按照用户要求直接写入硬盘。

5.2 摄像机参数设置及数据输入模块

5.2.1 摄像机参数设置

系统建立对话框类 CCamerSetParam, 通过设置类 CCamerSetParam 的基本变

量, 实现摄像机采样频率、图像显示的起始点、摄像机 USB 接口速度传送模式等基本参数值的设置。参数设置对话框如图 5-3 所示, 本系统摄像机采样频率默认设置为 3000Hz, 图像显示的起始点位置为 400, USB 接口速度传送模式为全速模式。

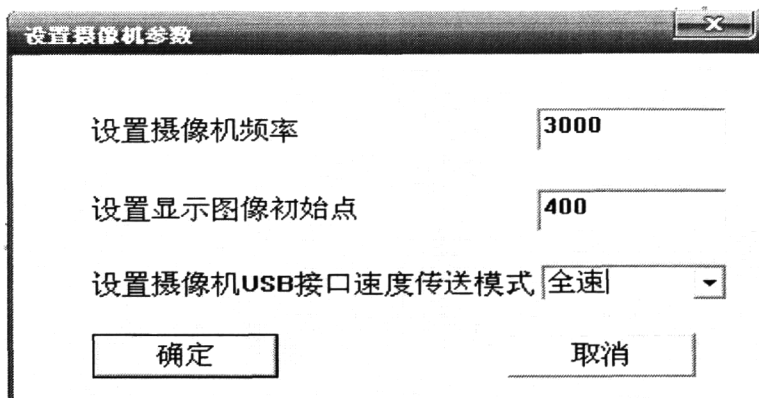


图 5-3 设置摄像机参数对话框图

只有在初始化摄像机后, 才能进行摄像机相应参数的设置操作, 要完成这些操作, 需要调用 DLL 库中的下列函数:

(1) `BYTE init_onuris(BYTE cam_nr)`, 此函数的功能是打开摄像机信道, 并对摄像机进行初始化。

(2) `BYTE set_scanrate(BYTE cam_nr, WORD freq)`, 设置摄像机扫描频率。

(3) `BYTE set_usb_speed(BYTE cam_nr, BYTE usbspeed)`, 设置 usb 接口数据传送模式。

5.2.2 数据输入

队列是一种限定存取位置的线性表, 只允许在表的一端输入数据, 在表的另一端删除数据^[13]。本系统建立容器类 `Queue`, `Queue` 是队列类, 用作存放图像数据的缓冲池, 缓冲池确定先进先出规则, 队列类 `Queue` 属性类型之一是类 `QueueNode`, 类 `QueueNode` 主要是临时管理一帧摄像机传送来的图像数据。文中声明了队列类 `Queue` 的两个对象 `qPixel1`, `qPixel2`, 这两个对象分别管理 1 号摄像机和 2 号摄像机传送来的原始图像数据。

队列中的主要操作有:

- (1) void InitQueue(), 初始化队列;
- (2) void EnQueue(BYTE *item), 原始图像数据插入队列头;
- (3) BOOL DeQueueHead(), 删除队列尾数据;
- (4) void ClearQueue(), 清空队列数据。

完成摄像机基本参数设置, 就可以对摄像机进行开始摄像、停止摄像、关闭摄像机等相关控制操作, 要实现这些操作, 同样需要调用 DLL 库中的相关函数:

- (1) BYTE start_video(BYTE cam_nr), 摄像机开始捕获图像;
- (2) BYTE get_data(BYTE cam_nr, BYTE *ppixel, DWORD len), 将摄像机中的图像传送给主机;
- (3) BYTE stop_video(BYTE cam_nr), 摄像机停止捕获图像;
- (4) BYTE close_onuris(BYTE cam_nr), 关闭摄像机。

摄像机传送来的图像数据, 首先存入图像数据缓冲池中, 缓冲池中的数据依序存入硬盘, 实现图像原始数据的永久保存。流程图如图 5-4 所示。

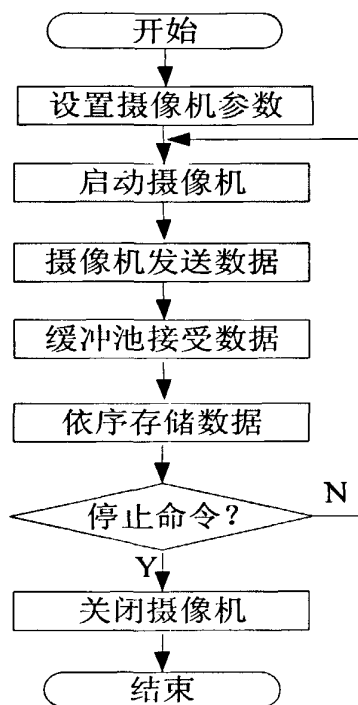


图 5-4 参数设置及图像输入流程图

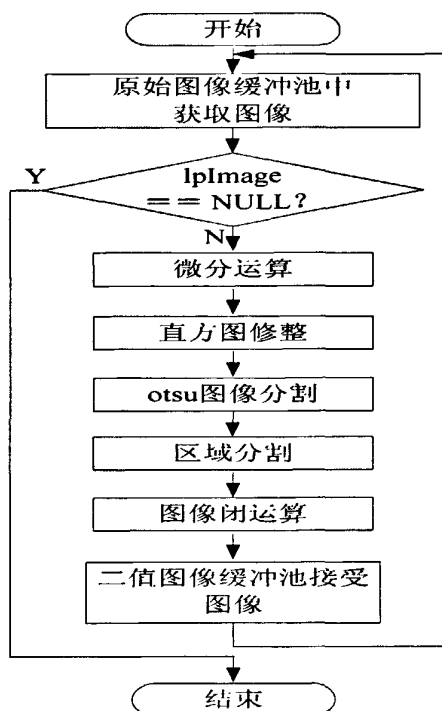


图 5-5 图像处理流程图

5.3 图像数据处理模块

图像数据处理模块，是本检测系统的核心模块，其处理结果的好坏，直接影响到系统的检测精度。本文中对图像数据主要是进行微分运算、图像分割、及图像形态学闭算，经过一序列处理后得出的值图像存入二值图像缓冲池中，供接触线目标预测与跟踪类 CTarget 提取，图像数据处理流程图如 5-5 所示。

(1) 图像微分运算

微分运算可以消除背景带来的影响，增强接触线目标边缘轮廓，便于图像进行后续处理。文中选取相邻连续 3 帧图像数据，组成临时“面阵”图像，与作为模板矩阵的 Sobel 算子进行卷积运算。由光学系统安装状态可知，在检测系统视场范围内，系统为接触线几何参数的变化，留有了足够大的裕量，正常情况下，接触线目标不可能超出检测系统的视场范围，所以本文中对组成的临时“面阵”图像的第一列及最后一列，均未作微分运算处理。图像微分运算流程图，如图 5-6 所示。运算结果如图 3-3(b) 或 3-5(b) 中所示。

(2) 直方图修整

文中所用到的直方图均衡化，是直方图修整法中最常用的一种方法，实现该算法的核心内容包含下面两部分：1) 计算原图像直方图，即各灰度值的计数；2) 建立灰度映射关系，求出各像素的灰度值。直方图修整法流程图，如图 5-7 所示。变换结果见图 3-6(b)。

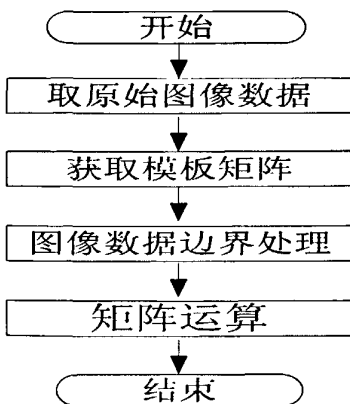


图 5-6 图像微分处理流程图

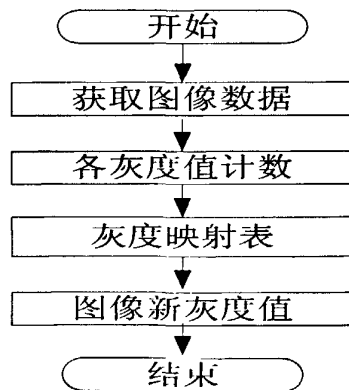


图 5-7 直方图修整法流程图

(3) 图像分割

为了更加有效地实现接触线目标图像从背景中分割出来，文中先后进行了

两次图像分割，分别是：阈值分割，区域分割。

● 阈值分割

阈值分割的关键是要准确求出分割阈值，结合图像实际情况，文中应用了 Otsu 算法，求出分割阈值。流程图中，变量 var_div 表示图像分割阈值， k 是表示将图像分为两类的灰度值， L 为图像最大灰度值， var 是表示类间方差值的中间变量，流程图如图 5-8 所示，分割结果见图 3-7(b)。

● 区域分割

将灰度值为 255 的连续像素点组成一个“区域”，当此区域像素宽度大于前一帧搜索窗内接触线目标宽度的 $\frac{1}{4}$ ，小于其宽度的 1.5 倍时，该区域作为疑似目标而被保留，否则将此区域作为背景处理，相应像素点灰度值置为 0。此算法有效的消除了小目标干扰物，算法流程图为 5-9 所示，分割结果见图 3-8(b)。

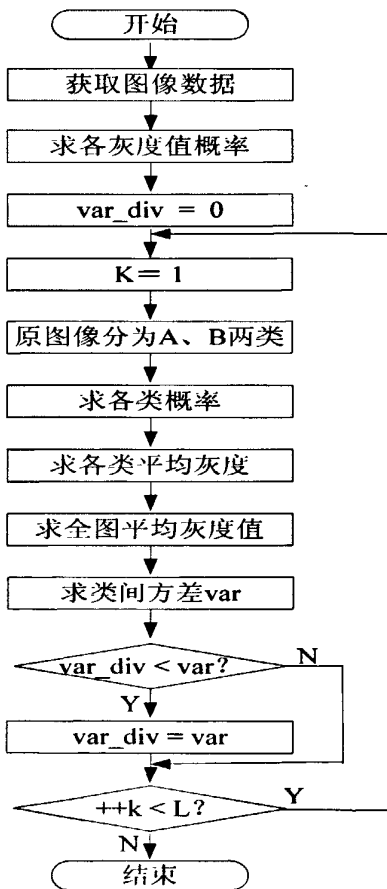


图 5-8 Otsu 算法流程图

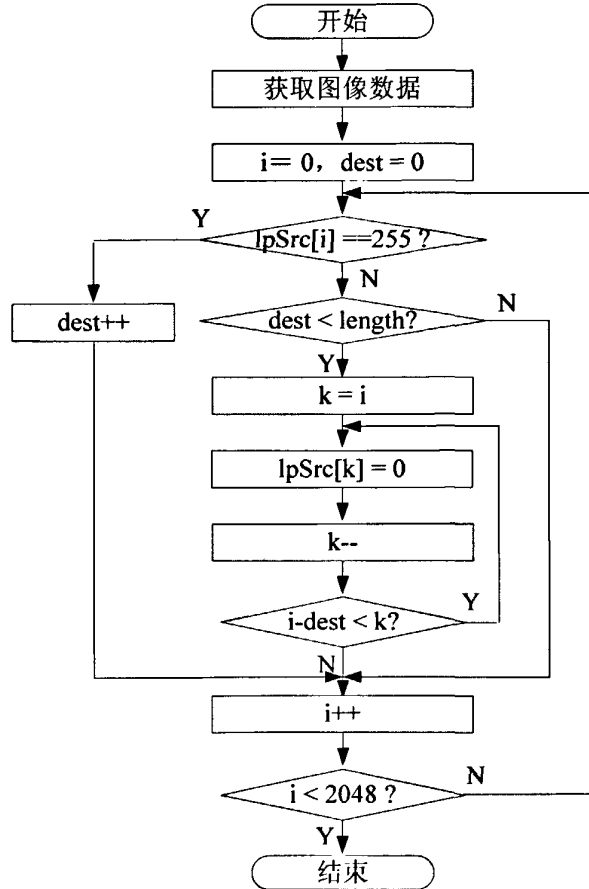


图 5-9 区域分割流程图

(4) 闭运算

在对图像进行闭运算时，图像必须以合理的方式转换为集合^[14]，闭运算处理过程分为两步：先对图像进行膨胀运算，将膨胀后的图像，再做腐蚀运算。膨胀和腐蚀的流程图分别如 5-10、5-11 所示。闭运算结果见图 3-10(b)。

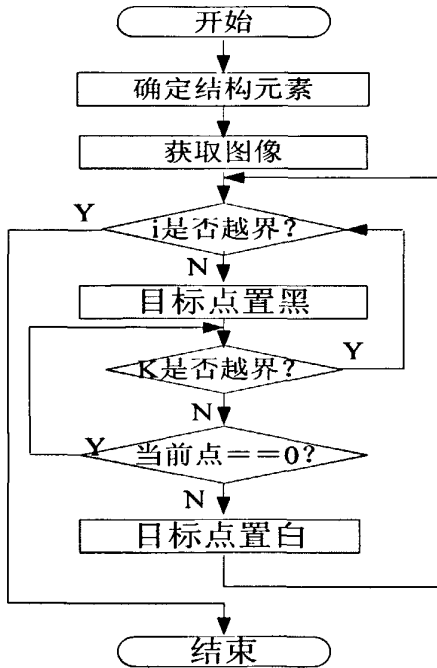


图 5-10 图像膨胀运算流程图

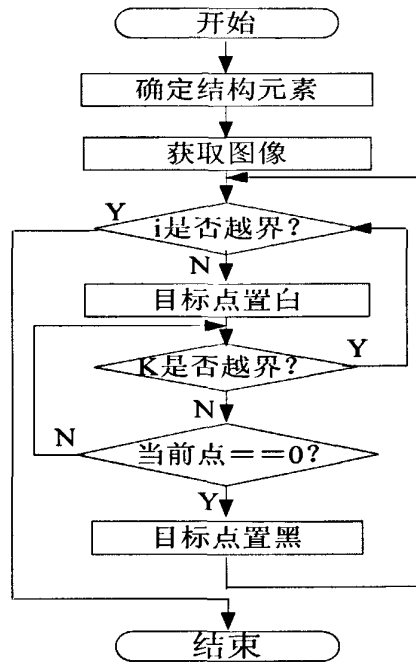


图 5-11 图像腐蚀运算流程图

5.4 接触线目标预测与跟踪

文中通过类类 CTarget、类 CCwlTagetQueue、CCwlTargetQueueNode 的协作，除了实现接触线目标图像的预测与跟踪，还能再次消除一些干扰物体造成的影响。类 CCwlTargetQueueNode 是接触线目标图像节点类，其基本属性分别表示接触线目标图像的起点、终点、图像宽度等基本参数；类 CCwlTagetQueue 是队列类，管理从二值图像缓冲池中提取的一帧图像数据中包含的所有接触线目标节点，通过调用类 CCwlTargetQueueNode 的构造函数，完成接触线目标节点参数的设置，并将接触线目标节点压入队列类 CCwlTagetQueue。

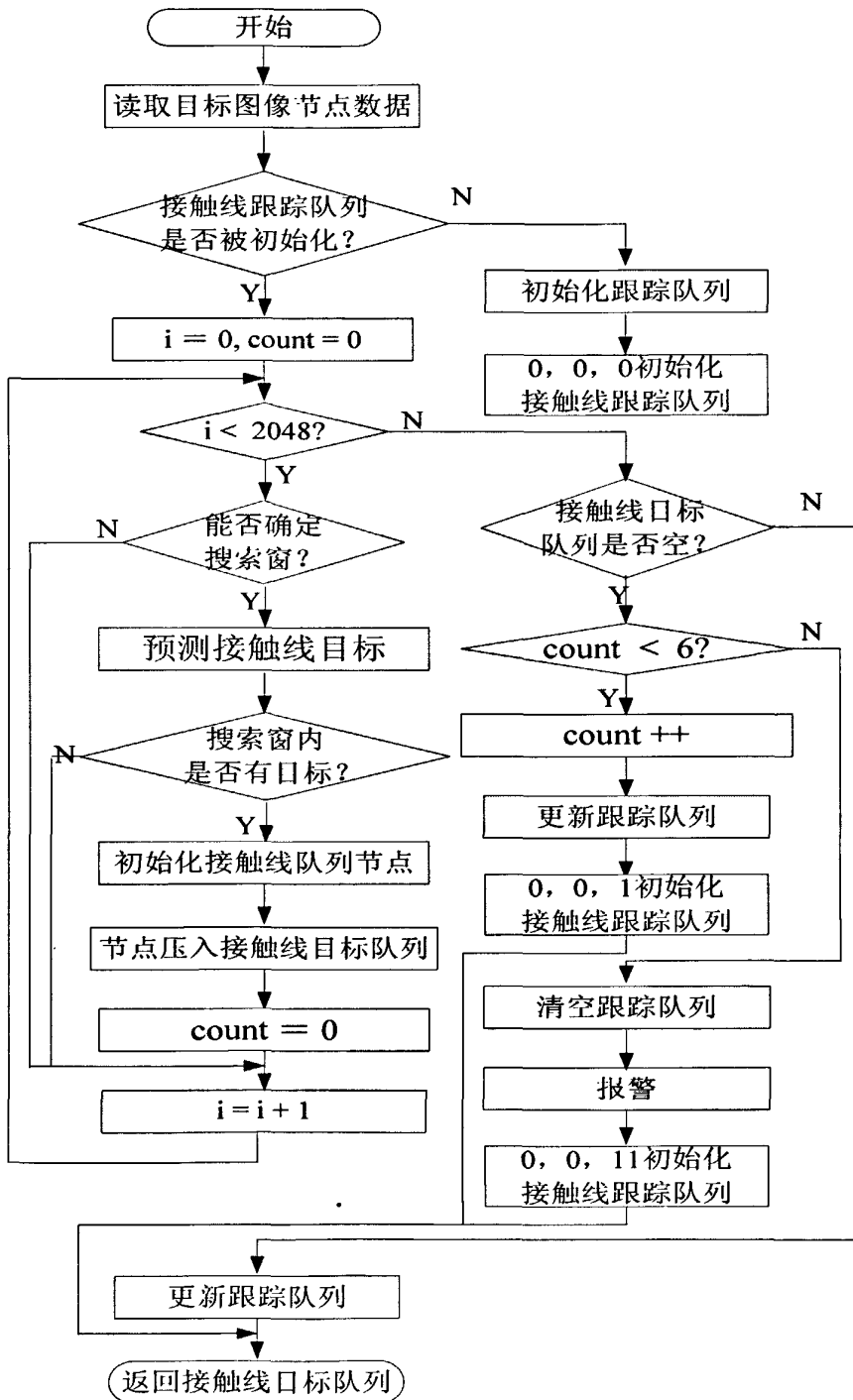


图 5-12 目标跟踪流程图

类 `CCwlTargetQueueNode` 和 `CCwlTargetQueue` 均是管理接触线量化后的目标图像节点数据，并没有实现接触线目标的预测与跟踪，接触线目标的预测与跟踪过程是在类 `Ctarget` 中实现的，利用前 4 帧接触线节点数据确定的搜索窗，实现第 5 帧数据中目标的预测与跟踪，处理流程如图 5-12 所示。首先，取相邻 5 帧队列数据，其中前 4 帧数据初始化接触线目标预测跟踪队列，初次确定接触线目标搜索窗口，在搜索窗口内完成第 5 帧数据中接触线目标的第一次预测与跟踪，随后按先进先出的原则，不断更新预测跟踪队列，实现接触线目标的预测与跟踪。

5.5 接触线几何参数计算

类 `CCwlParCal` 的主要作用是实现接触导线几何参数的计算，通过重载类的构造函数，实现只包含接触线目标图像的参数数据输入。由于目标对象的不确定性，所以首先通过函数 `CwlTargetAmount()` 确定目标的个数，如果两摄像机图像中最终确定的目标不相等时，丢掉此帧数据，当前位置接触导线的几何参数值默认为上一帧的值。当图像中有多个目标时，由函数 `CwlTargetMatch()` 匹配接触线图像中目标之间的对应映射关系。算出经过匹配的对应目标的基本参数，结合已经确定的摄像机焦距的大小、初始安装角、两摄像机中心点之间的长度参数，算出式 (2-6)、(2-7) 中的 $tg\alpha$ 、 $tg\beta$ 值，最后调用函数 `CalCwlGeometricPara()` 算出接触线的几何参数值。如果所取得的目标队列，只有一个节点，且表示接触线目标图像信息的节点的起始点和终止点，均为 0 时，依据此时所谓的“图像宽度”，确定出现这种情况的原因，当图像宽度信息为 1 时，表示暂时无目标信息，当前帧的接触线参数值默认为上一帧的参数值，当图像宽度值为 11 是，表示长时间没有检测到接触线目标，此时应该报警。该算法流程图，如图 5-13 所示。

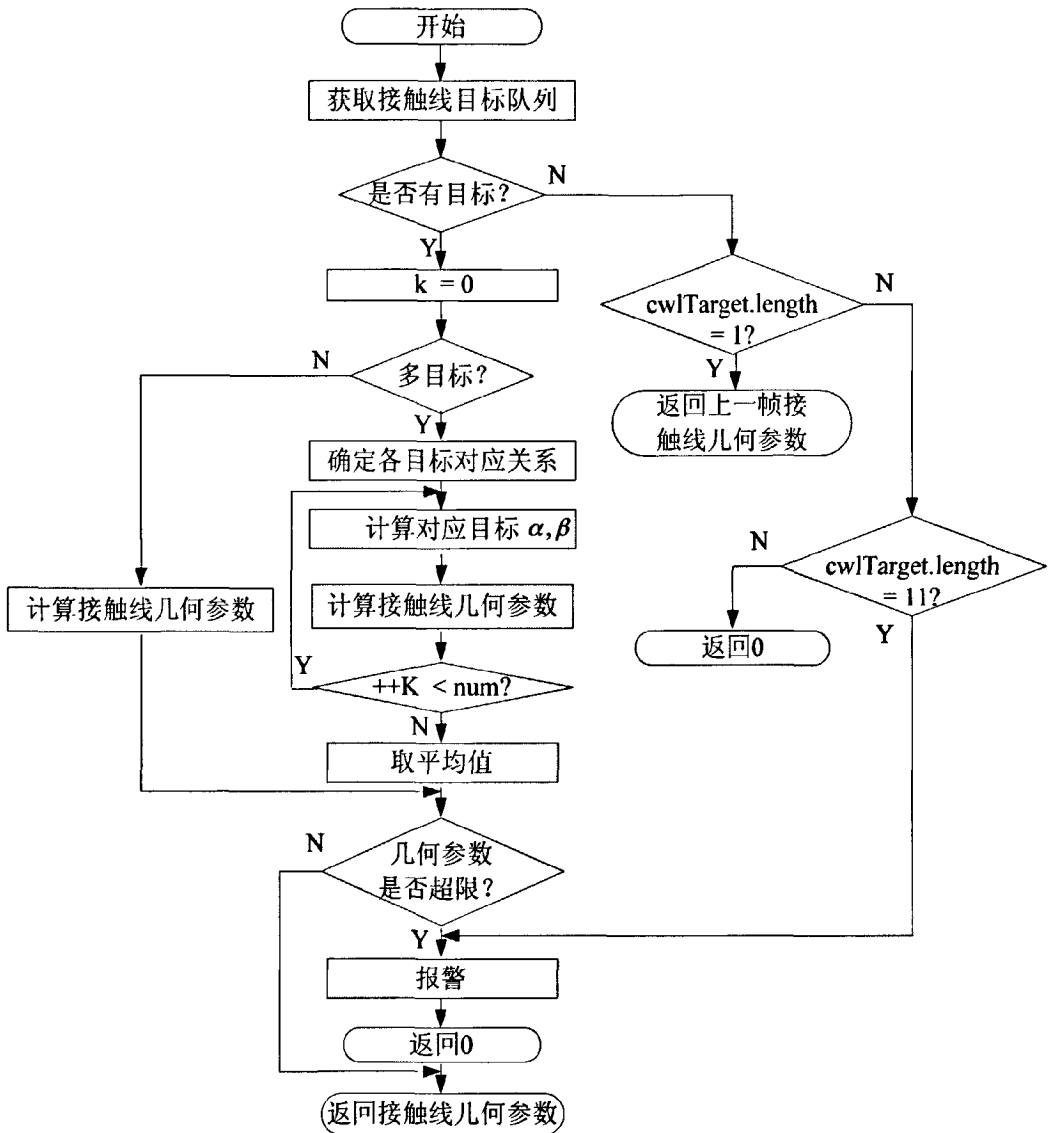


图 5-13 接触线几何参数计算流程图

5.6 系统测试

如图 5-14 所示, 检测系统, 界面简单, 功能实用, 主要实现“摄像机参数设置”控制功能、开始实施检测任务的“开始”控制按钮、使检测系统停止工作的“停止”控制按钮; 在选择工作摄像机组框中, 能实现对工作摄像机的

选择，供系统在某些环境下的调试使用；另有两个记录摄像机工作状态的状态框，分别记录系统运行过程中，摄像机工作的工作状况。依照外界光照情况，在光源控件中实现实现光源的开与关控制。在接触线检测结果控件中，则实时显示接触线几何参数值。界面右面设置了两个静态文本控件，位于上面的文本控件显示 1 号摄像机图像，下面的文本控件显示 2 号摄像机图像。

在整个系统研究工作的最后，还将此系统运用到接触网检测车上，对系统进行了现场测试，通过现场调试，证明了系统的可行性和正确性。图 5-14 中的检测结果是系统在兰州铁路局某一区段的测试结果图，图 5-15 和图 5-16 显示的是，通过本文设计的检测系统对接触线进行非接触式检测，得出的接触导线高度和拉出值变化曲线。为了便于比较，本人还用接触式测量方法测出了同一区段的接触线参数变化曲线图，分别如图 5-17，5-18 所示。图中，横坐标单位为米；纵坐标单位为毫米。

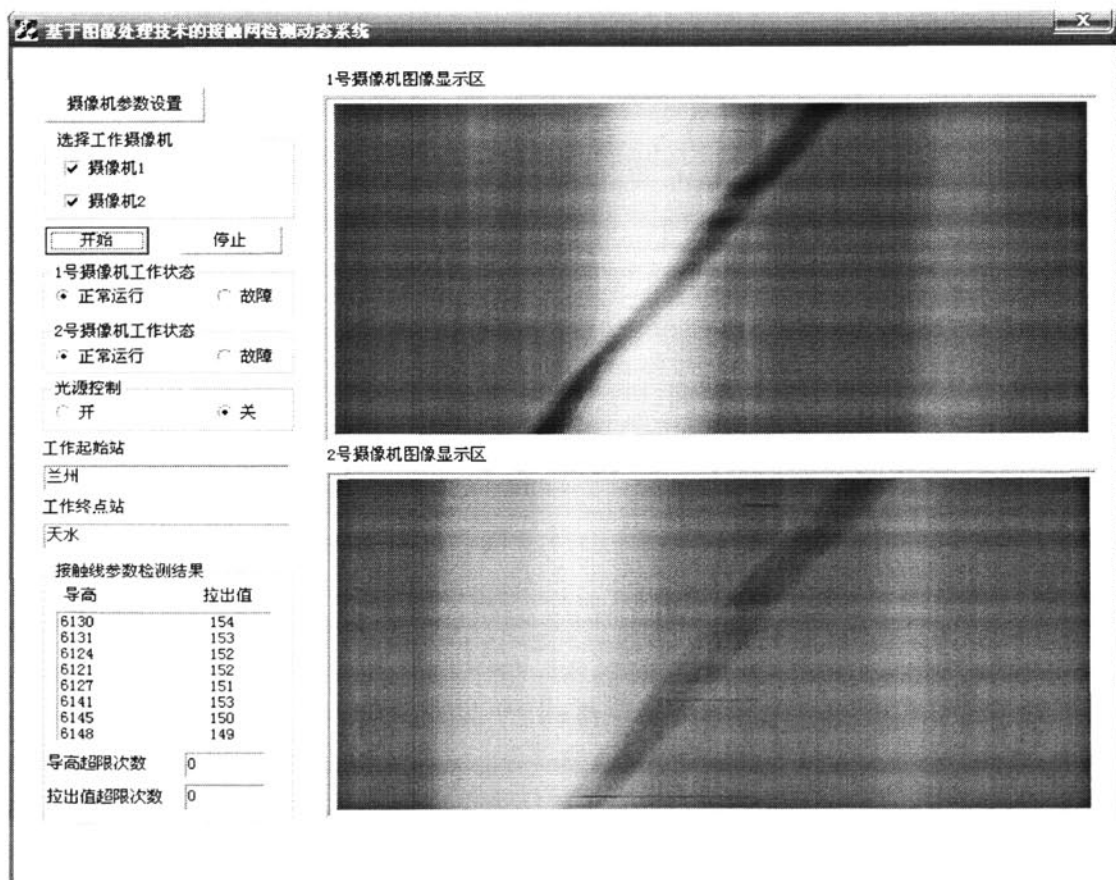


图 5-14 系统测试图

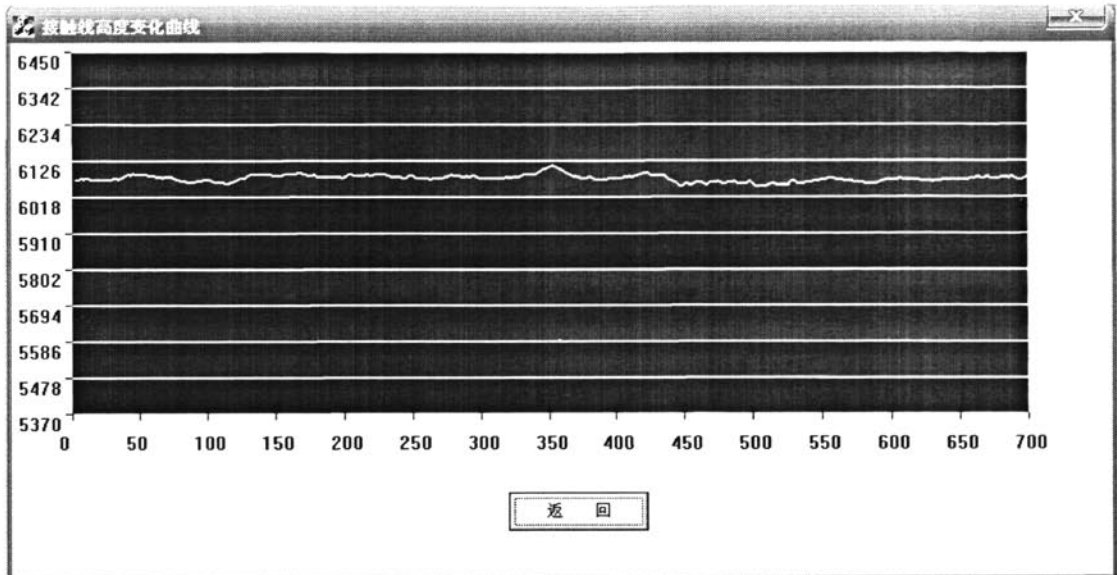


图 5—15 接触线高度变化曲线图（本系统检测结果）

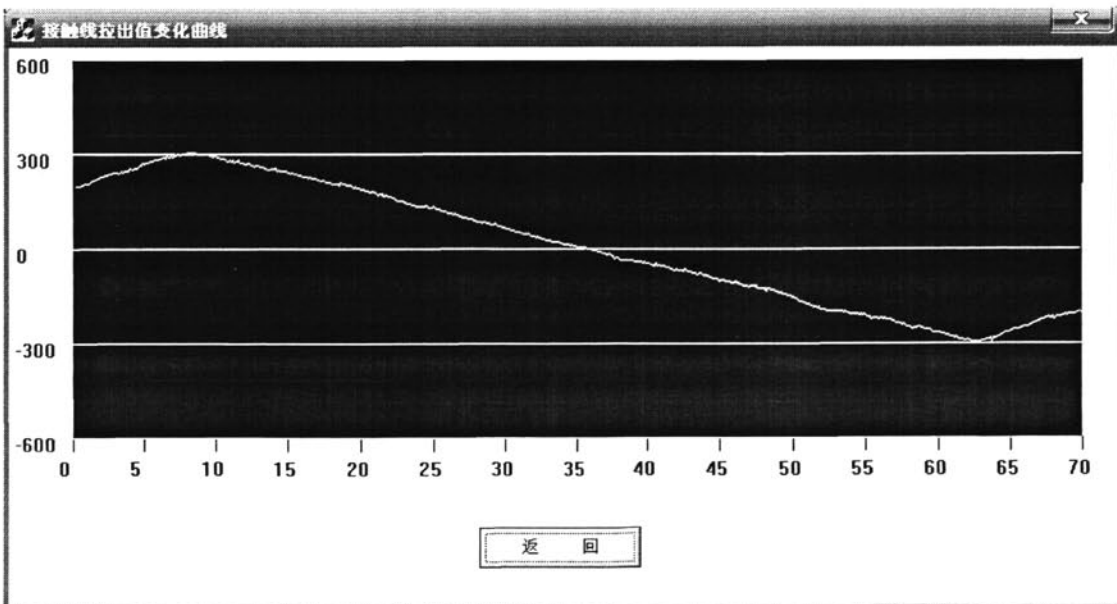


图 5—16 接触线拉出值变化曲线图（本系统检测结果）

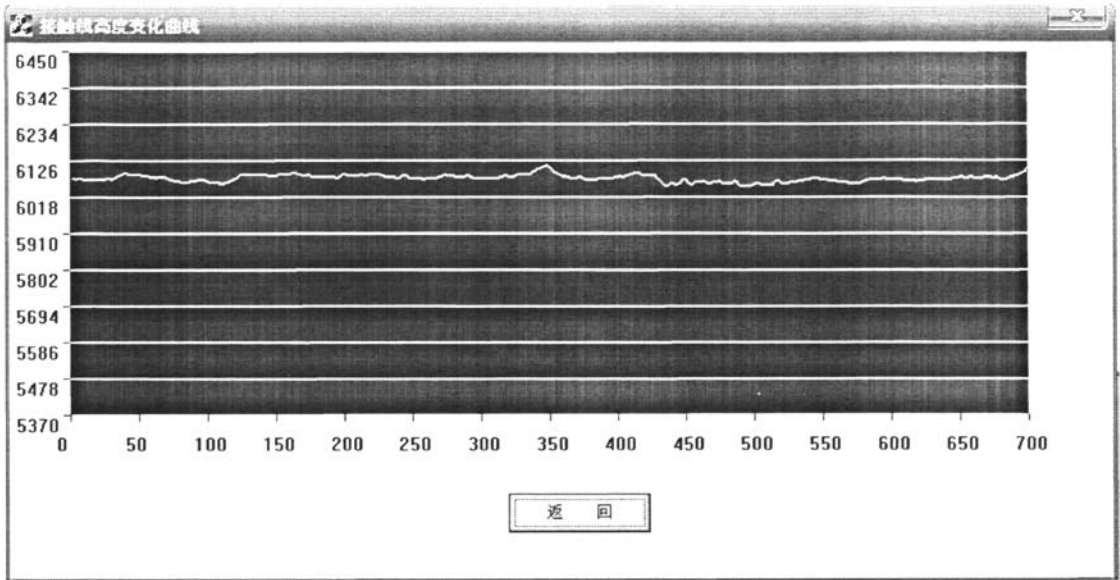


图 5-17 接触线高度变化曲线图（接触式检测）

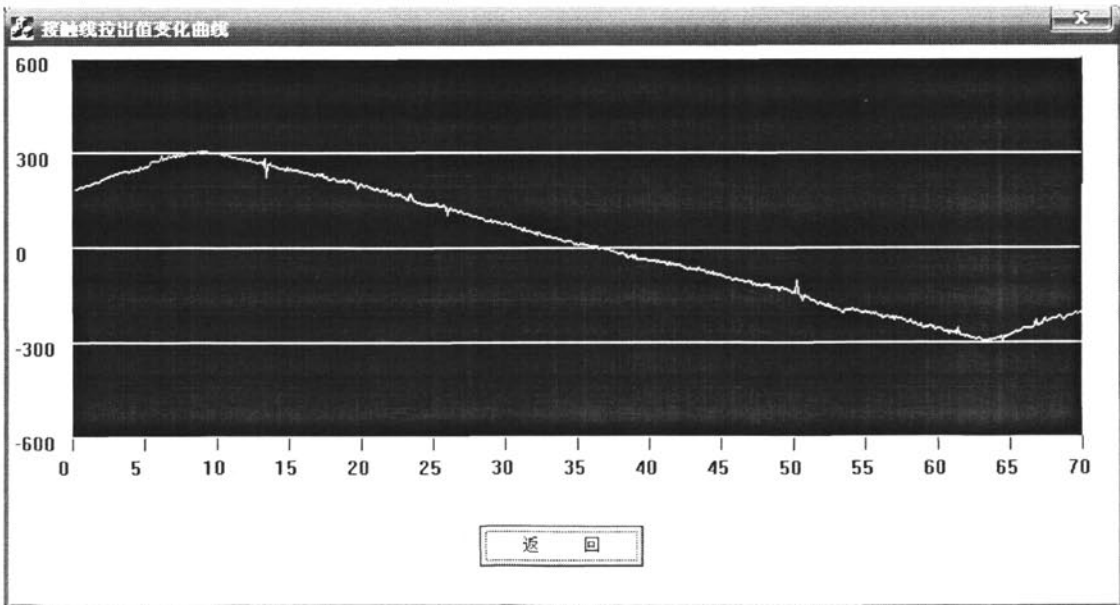


图 5-18 接触线拉出值变化曲线图（接触式检测）

比较以上接触线高度和拉出值变化曲线图可知,采用非接触式检测的接触线

几何参数比通过接触式检测所得曲线要平滑，主要原因是，由于接触式接触网检测系统，需要将传感器置于受电弓上，通过导线与传感器接触进行测量，传感器比较容易损坏，也比较受外界一些因素的干扰；传感器置于受电弓上，改变了受电弓的一些特性，从而导致接触网的震动特性也会发生一些变化。

非接触式检测方法，用安装于机车顶部的线阵列高速摄像机作测量传感器，不会影响受电弓的运行性能，并且测量信号的传输速度快，测量信号受外界干扰比较小。

结 论

随着高速电气化铁路的不断发展,对接触网检测技术的要求越来越高。为了提高接触网检测的速度和精度,本文应用数字图像处理技术,设计出了基于图像处理技术的高速接触线动态检测系统,该检测系统改变了传统的接触式测量方法,在运行调试中,性能稳定,实现了接触线几何参数的非接触式测量。本系统有以下特点:

(1) 基于两台共面 Onuris 线阵列高速摄像机的三角立体测量技术,实现了非接触式接触线测量技术的新发展。

(2) 本检测系统完全摒弃了机械运动部件,使摄像机、光源和接触线出现区域三者在任何检测环境中都能无延迟对中,提高了系统的实时检测速度以及系统的检测精度。

(3) 本检测系统具有两种工作模式:其一,升弓模式,进行动态参数检测;其二,降弓模式,进行静态参数检测。测量数据除了可以单独应用于动态品质的研究和静态检修维护以外,还可以对两种状态下的数据进行综合对比,为动态品质的研究提供更直观、可靠的分析基础。

(4) 深入剖析了接触线在 CCD 摄像机中的成像以及目标的匹配规律。根据接触线现场布置特点,文中对接触线目标的预测与跟踪,建立了相应的数学模型,实现了测量过程中的接触线目标有效跟踪。

可继续进行的研究工作:

(1) Windows 操作系统是非实时操作系统,不能根据应用需要裁减,建议采用嵌入式操作系统,一些常用算法采用汇编语言进行编写,提高检测系统的实时响应速度;优化图像处理算法,提高系统检测精度和运行效率。

(2) 由于铁路现场环境及其恶劣,背景干扰因素多,文中提出的目标跟踪算法有待于进一步改进。

致 谢

论文完成之际，心中百感交集，论文能够顺利完成，离不开老师、朋友、家人的支持和帮助。

首先我要向我的导师陈唐龙副教授表示最诚挚的感谢，从入学到学业完成，都得到了陈老师的悉心指导与勉励，我的顺利毕业，凝聚了他的心血与汗水！陈老师理论与实践相结合的研究方法、锐意进取的创新精神、严谨的工作作风，深深地感召着我，必将使我终生受益！

感谢同实验室的郭凤平、程维、牛大鹏、胡芬蓉、阎娜、李银生、马峰超、等同学，感谢同宿舍的刘荆飞、陈清华、赵大伟同学，大家一起学习，互相帮助，与他们在一起度过的美好时光，我将永远保存在记忆中。感谢杜奎生工程师在项目中给予的合作，感谢尹文祥三年来对我学习和生活上给予的帮助！

感谢含辛茹苦养育我，为我的成长呕心沥血的父母！感谢我的爱人刘登凤、弟弟，弟媳妇、妹妹对我的支持与理解！

感谢所有关心、支持和帮助过我的人！

参考文献

- [1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [2] 任艳华. 基于激光雷达技术接触网几何参数测试系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 中长期铁路网规划, 2004.
- [4] 吴积钦, 董昭德等. 铁道部客运专线接触网培训教材[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [5] 诸昌铃. 微计算机在电气化铁道接触网参数测试中的应用[J]. 微计算机应用, 1985 (1).
- [6] 陈唐龙. 接触网检测车振动补偿研究[J]. 西南交通大学学报, 1999 (2).
- [7] 陈唐龙. 高速铁路接触网检测若干关键技术研究[D]. 西南交通大学博士学位研究生论文, 2006.
- [8] 朱德胜. 德国接触网动态检测技术[J]. 电气化铁道, 2004 (3).
- [9] 李大为. 德国接触网动态接触压力检测及其缺陷判别技术浅析. 铁道标准设计, 2005 (8).
- [10] [美]Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods 著, 阮秋畸, 阮宇智 等译. 数字图像处理 (第二版). 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [11] 曾吉勇, 苏显渝. 折反射全景立体成像[D]. 博士学位论文, 四川大学, 20030430.
- [12] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] 殷人昆, 陶永雷, 谢若阳, 盛询华. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [14] 高守传, 姚领田. Visual C++实践与提高—数字图像处理工程应用篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [15] 崔屹, 图像处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 北京: 中国图形图像学报, 2002, 7 (9).
- [16] 高晓蓉. 传感器技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [17] 青莉. 接触导线几何参数测量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.

-
- [18] 沈庭芝, 方子文. 数字图像处理及模式识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [19] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [20] 胡国荣. 数字视频压缩及其标准[M]. 北京: 北京广播学院出版社, 1999.
- [21] 张益贞, 刘滔. Visual C++实现 MPEG/JPEG 编解码技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [22] 邓昌延, 高洪杰, 周曙光. 接触网参数非接触式测量系统的研制[J]. 铁道学报, 1990 (6).
- [23] [美]Jesse Liberty, Bradley Jones 著, 李佩乾, 杨小珂译. 21 天学通 C++(第五版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [24] 侯俊杰. 深入浅出 MFC(第二版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1998.
- [25] [美]Alan Bovik. Handbook of Image and Video Processing, Second Edition[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [26] L A Spacek, 1986. "Edge detection and motion". Image and Vision Computing, Vol 4, pp 43-53.
- [27] 王跃科, 杨华勇. CCD 图像传感技术的现状与应用前景. 光学仪器, 1996, 18(5) .
- [28] T Y Young and K S Fu(eds), 1986. Handbook of Pattern Recognition and Image Processing, Academic Press, ISBN 0_17_774560_2.
- [29] 徐跃良. 数值分析[M]. 成都, 西南交通大学, 2005.
- [30] S.Borromeo, J.L.Aparicio. Automatic Systems for Wear Measurement of Contact Wire in Raikways[J]. MCRR' 01, November, 2001.
- [31] H.Hoefler, M.Seib, M.Dambacher. Hight Speed Overhead Wire Monitoring[J],. MCRR' 01, November, 2001.
- [32] E.Dubois. Motion-compensated filtering of time-varying image[J]. Multidimens, Syst. Signal Process, 3, 211-239, 1992.
- [33] H. Aly, E. Dubois. Design of optimal camera apertures adapted to display devices over arbitrary sampling lattices[M]. IEEE Signal Process. Apr, 2004
- [34] 夏云龙. 最新 Visual C++使用手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [35] 谭浩强. C 程序设计(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
-

-
- [36] 朱挺, 汤友福. 线阵列 CCD 摄像机技术在铁路电力接触线高速检测方面的应用. 上海铁道科技, 2004. 03.
- [37] Ziou, D. The Influence of Edge Direction on the Estimation of Edge Contraet and Orientation[J]. Pattern Recog. 2001, vol 34, no. 4, pp. 855-343.
- [38] Fu k S. A Survey on Image Segmentation[J]. Pattern Recognition. 1981, 13(1):3~16.
- [39] Brink A D. Thresholding of digital images using two-dimensional entropics[J]. Pattern Recognition. 1992, 25(8):803~808.
- [40] 刘键庄, 粟文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割方法[J]. 自动化学报. 1993, 19(1):101~105.
- [41] 二维 Otsu 自适应阈值分割算法的改进 .
[http://www. jd37. com/tech/20063/9717. html](http://www.jd37.com/tech/20063/9717.html)
- [42] El-Khamy, S. E., Lotfy, M.. A modified fuzzy Sobel edge detector[J]. Radio Science Conference, 2000. 17th NRSC '2000. Seventeenth National. 22-24 Feb. 2000 Page(s):C32/1 - C32/9.
- [43] 郑莉, 董渊. C++语言程序设计(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [44] Borrromeo S, Aparicio L, Martinez. Contact Wire Thickness measuring system used by the Spanish National Railway[J], 2001.
- [45] Anil K. Jain, Fundamentals of digital image processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J, 1989
- [46] Jae S. Lim, Two-dimensional signal and image processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1990
- [47] Louis J. Galbiati, Machine vision and digital image processing fundamentals, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1990.
- [48] Jean Serra and Pierre Soille (eds), Mathematical morphology and its applications to image processing, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994
- [49] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle, Image processing, analysis, and machine vision , Chapman & Hall Computing, London, 1993
-

-
- [50] Edward Dougherty (ed.), Mathematical morphology in image processing, M. Dekker, New York, 1993
- [51] Ferdinand van der Heijden, Image based measurement systems: object recognition and parameter estimation, John Wiley & Sons, Chichester, 1994.
- [52] Cornelius T. Leondes (ed), Image processing and pattern recognition, Calif. Academic press, San Diego, 1998
- [53] Sing-Tze Bow, Pattern recognition and image preprocessing, M. Dekker, New York, 1992
-

攻读硕士期间发表的论文

1. 蔡学敬, 陈唐龙, 牛大鹏. 基于 Onuris 线阵摄像技术的高速电气化铁路接触网动态检测技术. 轨道交通, 2007 年第 5 期.
 2. 陈维, 蔡学敬. TMS32VC5402 HPI 接口及 PCI 总线接口设计. 单片机与嵌入式系统应用, 2006 年第 10 期.
-