

# 基于多核并行技术的高铁接触网绝缘子 异常检测系统的研究与实现

作者姓名\_\_\_\_\_黄辉煌\_\_\_\_\_

学校导师姓名、职称\_\_\_\_\_刘志镜 教授\_\_\_\_\_

企业导师姓名、职称\_\_\_\_\_李小勇 高工\_\_\_\_\_

申请学位类别\_\_\_\_\_工程硕士\_\_\_\_\_



学校代码 10701  
分 类 号 TP39

学 号 1403121811  
密 级 公开

# 西安电子科技大学

## 硕士学位论文

### 基于多核并行技术的高铁接触网绝缘子 异常检测系统的研究与实现

作者姓名：黄辉煌

领 域：计算机技术

学位类别：工程硕士

学校导师姓名、职称：刘志镜 教授

企业导师姓名、职称：李小勇 高工

学 院：计算机学院

提交日期：2017 年 6 月



# **The Research and Implementation of Anomaly Detection System on High-speed Rail Catenary Insulator Based on Multi-core Parallel Technology**

A thesis submitted to  
XIDIAN UNIVERSITY  
in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master  
in Computer Technology

By

Huang Huihuang

Supervisor: Liu Zhijing      Title: Professor

Supervisor: Li Xiaoyong      Title: Senior Engineer

June 2017



## 西安电子科技大学 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安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。与我一同工作的同事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了谢意。

学位论文若有不实之处，本人承担一切法律责任。

本人签名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_

## 西安电子科技大学 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅、借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，结合学位论文研究成果完成的论文、发明专利等成果，署名为西安电子科技大学。

保密的学位论文在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本人签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_





## 摘要

绝缘子是接触网支撑及悬挂装置的关键部件,起着悬挂装置中带电部分与绝缘部分的电气隔离及对悬挂装置的支撑作用等等。但是由于工作时间长,工作环境恶劣,绝缘子容易出现破损及夹杂异物的状态,轻则影响绝缘性能,重则造成跳闸,严重影响列车运营安全。

本文首先概要描述了机器学习理论技术,多核并行技术发展历史及 OpenMP 并行开发方案,并对本文相关图像处理与识别技术展开介绍,包括高斯滤波、基于 Canny 算子的边缘提取技术、基于 Hough 变换的直线提取技术以及介绍多种图像相似度对比技术等。在此基础上,本文结合铁路局绝缘子异常检测需要,使用用例图的方式作出了系统需求分析和总体设计框架。在数据库设计方面,本文利用实体图及设计表格等方式对数据库设计进行说明。

随后本文介绍了绝缘子异常检测系统的五个子模块设计与实现,分别为图像预处理模块、机器学习模块、异常识别模块、人工精检模块和多核并行检测模块。在图像预处理模块,系统通过随机概率统计的方式过滤过度曝光或曝光不足的巡检图片,通过提取直线信息对重复拍摄的图片加以剔除,并进行图像增强处理;在机器学习模块,系统通过对巡检样例图片提取特征进行机器学习建模,建立绝缘子结构级联分类器,识别绝缘子所在图片区域;在异常识别模块,系统基于 Gabor 滤波判断绝缘子偏斜角度,并通过灰度统计的方式判断绝缘子是否存在缺陷异常;在人工精检模块,本文通过时序图的方式展开设计,阐述了人工精检系统确定绝缘子缺陷异常的过程;在多核并行检测实现模块,本文结合 OpenMP 多核编程框架阐述多核技术在本系统各功能模块的应用过程。

本文最后介绍了系统开发及测试环境,并分析系统各功能模块在不同分辨率图片、不同 CPU 核心数、不同应用场景等基础上的运行效果。实验证明本系统能在不同 CPU 核心的计算机上高效运行,并能以较高的处理速度和检测效率对绝缘子异常进行自动化检测,精检页面人机交互效果良好。

**关 键 字:** 多核并行, 机器学习, 特征提取, 异常检测



## ABSTRACT

Insulators are important parts of Catenary suspension and supporting devices, which perform well in isolating live part and insulation part. However, due to the long working hours and poor working environment, insulators are prone to damaged and be contained with foreign matters. It might affect the performance of insulation, even cause tripping, and it makes great challenge to train operation safety.

Above all, this paper introduces the machine learning theory and technology, the development history of multi-core parallel technology including OpenMP development scheme. In addition, this paper introduces the related image processing and image recognition technology, including Gauss filter, edge extraction technology based on Canny operator, line extraction technology based on Hough Transform and several image similarity comparing technology. On this basis, combined with the need of insulator anomaly detection of the Railway Bureau, this paper use User Case Diagram to make the system requirements analysis and the overall design framework. This paper describes the design of database by means of the Entity Diagram and tables.

Subsequently, this paper introduces the design and implementation of the five sub modules of the anomaly detection system. The five sub modules are image preprocessing module, machine learning module, anomaly detecting module, manual accurate detecting module and multi-core parallel detecting module. In image preprocessing module, this system filters the picture of excessive exposure or lack of exposure, and the picture of repeat shooting by extracting line information. Later, the system enhances the image. In machine learning module, by extracting the feature of sample pictures, the system does modeling of insulators. Through modeling results, the system creates cascade classifier of insulators, which is used to located the position of insulator in the picture. In anomaly recognition module, the system gets angle of deflection by Gabor filter. Furtherly, the system determines whether there is abnormal insulator by the means of gray level statistic. In manual accurate detecting module, the paper describes the process of detecting abnormal insulators manually which is designed by the method of sequence diagram. In multi-core parallel detecting

module, this paper introduces the application of parallel technology in the system based on OpenMP multi-core programming framework.

Finally, this paper describes the development and testing environment. Besides, this paper analyzes the effect of each functional module of the system on the basis of different resolution images, different CPU cores and different application scenarios. Experiments show that the system can run efficiently on different CPU core computers. The system can detect anomaly of insulators automatically with higher processing speed and higher detection efficiency. The accurate detecting system is confirmed to have good human-computer interaction.

**Keywords:** Multi-core Parallel, Machine Learning, Feature Extraction, Anomaly Detect

## 插图索引

图 2.1 单个并行域.....	8
图 2.2 多个并行域.....	8
图 2.3 非极大值抑制.....	12
图 3.1 系统需求功能结构图.....	15
图 3.2 机器学习用例图.....	18
图 3.3 图像预处理用例图.....	18
图 3.4 异常识别模块用例图.....	19
图 3.5 人工精检模块用例图.....	19
图 3.6 系统体系结构图.....	20
图 3.7 数据流程图.....	21
图 3.8 工作人员实体图.....	22
图 3.9 缺陷日志实体图.....	23
图 3.10 日志处理进程实体图.....	23
图 4.1 HAAR 特征训练级联分类器框架图 .....	28
图 4.2 HAAR 特征模板 .....	29
图 4.3 绝缘子识别示意图.....	30
图 4.4 无效图像检测流程图.....	32
图 4.5 重复拍摄的巡检图片示意图.....	34
图 4.6 部分剔除重复拍摄图片算法流程图.....	35
图 4.7 巡检图片直线提取效果图.....	35
图 4.8 三段线性变换图增强对比度.....	36
图 4.9 求取主方向流程图.....	38
图 4.10 绝缘子异常图.....	40
图 4.11 绝缘子灰度统计图.....	41
图 4.12 人工精检模块类图.....	42
图 4.13 图像加载与调节时序图.....	43
图 4.14 缺陷图片日志记录时序图.....	44
图 4.15 批量图像并行处理图.....	45
图 5.1 图像识别部分数据源.....	49
图 5.2 智能粗检模块运行界面图.....	50
图 5.3 人工精检模块界面图.....	51



## 表格索引

表 3.1 用户信息表.....	24
表 3.2 缺陷日志表.....	24
表 3.3 日志处理进程表.....	25
表 5.1 图象预处理的多核并行处理.....	48
表 5.2 绝缘子识别的多核并行处理.....	48
表 5.3 绝缘子识别时间与准确率.....	49
表 5.4 异常检测结果统计表.....	50
表 5.5 粗检系统测试表.....	51
表 5.6 人工精检模块测试结果表.....	52





## 符号对照表

符号	符号名称
$\Sigma$	求和
$ x $	绝对值
$\sin$	正弦函数
$\cos$	余弦函数
$\exp$	以 e 为底的指数函数
$\sqrt{\quad}$	开方运算



## 缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
MFC	Microsoft Foundation Classes	微软基础类库
DP	Development Process	流程图
ROI	Region Of Interest	感兴趣区域



# 目录

摘要.....	I
ABSTRACT .....	III
插图索引.....	V
表格索引.....	VII
符号对照表.....	IX
缩略语对照表.....	XI
<b>第一章 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 选题背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 论文相关工作.....	2
1.3 论文组织结构.....	4
<b>第二章 相关理论和技术 .....</b>	<b>7</b>
2.1 Adaboost 机器学习方法 .....	7
2.2 多核并行技术.....	7
2.3 图像处理与识别技术.....	9
2.3.1 高斯滤波.....	9
2.3.2 Canny 边缘提取 .....	10
2.3.3 Hough 直线提取.....	13
2.3.4 图像相似度对比.....	13
2.4 本章小结.....	14
<b>第三章 需求分析与总体设计 .....</b>	<b>15</b>
3.1 需求分析.....	15
3.1.1 需求概述.....	15
3.1.2 设计原则.....	16
3.1.3 系统目标.....	17
3.1.4 功能分析.....	17
3.2 系统整体框架.....	20
3.3 系统数据库设计 .....	22
3.3.1 数据库概念设计.....	22
3.3.2 数据库表设计.....	24

3.4 本章小结.....	25
<b>第四章 系统模块设计与实现 .....</b>	<b>27</b>
4.1 机器学习模块.....	27
4.1.1 级联分类器训练过程.....	27
4.1.2 级联分类器的使用.....	29
4.1.3 识别与定位绝缘子.....	29
4.2 图像预处理模块.....	31
4.2.1 随机概率统计过滤无效图片.....	31
4.2.2 部分剔除重复拍摄图片.....	33
4.2.3 图像增强.....	36
4.3 异常识别模块.....	37
4.3.1 基于主方向的巡检图片偏斜度确定方法.....	37
4.3.2 基于灰度统计的异常识别方法.....	40
4.4 人工精检模块 .....	42
4.5 多核并行检测 .....	44
4.6 本章小结.....	46
<b>第五章 实验与分析 .....</b>	<b>47</b>
5.1 实验介绍.....	47
5.2 实验环境 .....	47
5.3 实验结果与结论 .....	48
5.3.1 多核并行处理.....	48
5.3.2 绝缘子识别.....	48
5.3.3 绝缘子异常检测.....	49
5.3.4 人工精检系统.....	51
5.4 本章小结.....	52
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>53</b>
6.1 总结.....	53
6.2 展望.....	53
<b>参考文献.....</b>	<b>55</b>
<b>致谢.....</b>	<b>57</b>
<b>作者简介.....</b>	<b>59</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 选题背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

在铁路列车行进过程中，接触网被架设在铁路沿线为列车的行驶提供电力支撑，为铁路列车的安全行驶提供了有效保障。绝缘子是架设于铁路线路中的绝缘控件，在带电导体之间，或带电导体与地面之间保持绝缘作用<sup>[1]</sup>。

牵引供电系统的绝缘子按照用途分有以下几种类别：接触网用的棒式绝缘子、悬式绝缘子、附加导线柱式绝缘子，分段绝缘器的桥绝缘子等<sup>[2]</sup>；变电所用的支柱绝缘子、穿墙套管等。本论文以铁路线路安全巡检为依托，主要研究接触网用途的相关绝缘子。常见的输电线路绝缘子故障包括：绝缘子破损、绝缘子低阻值、绝缘子污秽度等<sup>[4]</sup>。该故障体现为绝缘子表面因为器件缺失或异物附着体现出分布不规律的特性。

在现有的铁路接触网安全巡检过程中，主要是通过采购接触网安全巡检装置（2C）来进行线路安全状态检测，这在列车的安全行驶过程中发挥着重要的作用，尤其是在检测接触网设备缺陷、保证供电设备安全方面发挥着重要作用。在接触网状态异常识别上，目前的接触网安全巡检装置主要通过人工排查的方式进行识别和处理。即预先将装有高速摄像头的安全巡检装置架设于列车车头，该装置在列车行进过程中不间断拍摄沿线接触网图像并保存在本地存储设备中。待列车完成该车次运行后，铁路工作人员将存有该线路接触网巡检图片的存储设备接入工作计算机，由专人逐张检查巡检图片，判断接触网结构是否存在异常。对于判断存在疑似异常的部件，工作人员记录异常情况 & 部件位置并报请维修人员到现场进行维护。

在接触网异常类型中，绝缘子故障是影响列车安全行驶的重要原因之一。绝缘子异常的检测目前主要利用接触网一系列巡检图片进行人工识别与检测，检测过程耗时耗力。另因为绝缘子部件较小，根据巡检图片往往容易造成工作人员的视觉疲劳，进而造成绝缘子故障的错检漏检等情况。人工检测的低效率也容易影响接触网线路异常的处理效率，造成铁路线路的运营存在极大的安全隐患。

当前国内外检测接触网运行情况的算法多种多样，从检测手段上可以主要分为以下两种。一种通过传感器进行接触式检测<sup>[5]</sup>，一般安装于受电弓滑块上。该方法存在多种缺陷，在一定程度上会影响铁路列车的受流质量，高铁的接触网供电电压 27.5kV，接触网检测设备与之直接物理接触将会对列车安全形势造成威

胁；除此之外，物理接触式的异常探测方法都会对导线造成干扰，也会因为其探测频率低，数据在列车连续行进的过程中波动并不能有效地产生并被分析，尤其是在吊弦的设置部分。

另一种方法则是通过高速摄像头跟随列车对环境进行拍摄，并将拍摄结果用于后期图像识别与处理，可实现非接触式检测，最常见的做法是运营电力机车检测弓网状态<sup>[6]</sup>。对全线接触网设备进行检测后，需要专职人员再对观测记录的大量接触网运行图像数据进行回放分析，判读是否存在异常状态。但这种方式效率低下，需要耗费大量时间和精力。

### 1.1.2 研究意义

随着芯片制造工艺及存储技术的发展，存储器所能存储的数据在相应地增加。在列车行驶过程中，接触网巡检装置得以跟随列车不断拍摄接触网巡检图片，在列车完成往返行驶后装置将存有大量清晰的线路接触网巡检图片。然而大批量的图片对工作人员进行异常识别与定位造成了巨大的工作困扰，也对列车安全的行驶提出了新的考验。

近年来，基于机器学习的图像处理技术取得了巨大的提高<sup>[7]</sup>，图像中的物体识别在准确度和时间效率上都有了极大地提升。例如在人群中的滞留物识别与检测、贵重物品安全检测等方面的应用为人民生活水平的提升取到了很大的促进作用。与此同时，随着个人计算机硬件配置的不断提高，多核处理器已经是当前计算机的标准配置。多核处理器的普及也为软件的处理效率提高了更加行之有效的支持，使得计算机快速地批量处理接触网巡检图片成为可能。

根据图像进行接触网异常的识别属于“非接触式检测方案”，它避开了接触式检测接触网异常检测方案的不足，在检测接触网异常的同时不危及铁路列车的平稳安全运行。同时，研究高铁接触网运行异常检测系统，能方便地对高铁接触网运行异常数据进行分析 and 处理，如此而来能作为维护接触网设备安全质量的有效办法。除此之外，系统中存储的接触网数据将能非常有效地辅助未来接触网安全巡检，也为生产调度部门的生产调度提供了巨大便利。非接触式接触网绝缘子检测方案是当前国外弓网安全检查领域的发展趋势，在国内也得到了广大铁路从业人员的认可。

## 1.2 论文相关工作

本论文的相关工作是以接触网绝缘子异常的智能识别与检测为基础，结合多核并行技术，设计并实现一个高效的接触网绝缘子异常检测系统。本系统在开发完成后将达到以下要求：



(1) 采集巡检图片的 HAAR 特征，通过 Adaboost 机器学习方式生成绝缘子结构的级联分类器，用于后续绝缘子的定位与异常检测

(2) 利用 OpenMP 多核处理框架，并行读取源文件夹中的图片，将巡检图片转换成尺度较小、只包含边缘信息的二值图，并对图片进行去噪等图像处理，方便快速而准确地进行下一步图像信息获取。

(3) 采用离线生成的绝缘子级联分类器批量处理接触网巡检图片，定位图片中的绝缘子位置。

(4) 有效丢弃一系列巡检图片中拍摄位置相近的图片，并将无效的图片分类报警，包含曝光过度的图片、光线严重不足的图片以及复杂无法处理的图片进行标识。

(5) 识别图片中绝缘子区域是否存在异常，如果存在疑似异常即将该图片输出到指定目录，方便工作人员查看疑似异常所在的接触网支撑结构的杆号。

(6) 提供精检功能，即在完成机器智能自动粗检筛选出疑似异常后，工作人员选择筛选出的存在疑似异常的图片，系统可以对图片进行亮度、对比度等的调节，可以对指定位置进行缩放以进一步确认异常识别的正确性。

(7) 提供人机友好的交互方式。

本文将重点研究以下内容：

(1) 利用多核并行技术对图片进行预处理

根据巡检图片质量，结合多核并行技术对巡检图片进行快速预处理。有效提取图片的边缘信息作为二值图进行存储和操作，将复杂室外环境对图片造成的噪点进行过滤。在预处理过程中，重点针对轨道石子、树木花草、云朵、鸟类、建筑等背景进行一定的信息消除，减小对绝缘子异常检测造成干扰。

(2) 准确判断巡检图片中无效图片

因为巡检图片随着列车的行驶不间断地拍摄，因而在列车进站、临时停车等因素造成告诉摄像机摄入大量重复图片，为接触网异常检测增加了较多额外工作量。除此之外，因为列车走向可能正对太阳造成曝光过度，或者因为夜间行驶造成巡检图片光线不足进而缺少必要的细节信息。本系统需要有效检测出以上无效图片，标记图片信息并提示系统用户。

(3) 准确判断属于同一绝缘子支撑结构的重复拍摄图片

因为巡检图片随着列车行进过程以一定的时间间隔进行采集，因而在不断靠近某一接触网支撑结构的过程中可能会重复拍摄同一个绝缘子结构，对系统的计算资源造成一定的浪费。本系统需要对巡检图片中重复拍摄的图片加以过滤，避免后期异常识别处理的重复。

(4) 利用机器学习技术获得绝缘子级联分类器

对巡检图片提取 HAAR 特征，对铁路线路巡检图片进行 Adaboost 机器学习，生成学习结果文件.xml 文件，用于后续在待检测图片中准确定位绝缘子位置。机器学习在识别与异常检测阶段之前独立运行，预留接口方便后续线路更新后可以重新训练获得绝缘子分类器。

#### (5) 探索绝缘子异常检测办法

在利用机器学习技术定位绝缘子在巡检图片中的位置后，尝试通过待检测图片的边缘信息判断是否存在异常。正常的绝缘子结构轮廓有明显规律，在竖直方向有更为清晰的边缘特征。对于存有破损、异物等异常的绝缘子，探索结合 Gabor 滤波判断绝缘子偏斜角度，利用灰度统计方法检测异常。最终将巡检图片中含有疑似异常的图片筛选出来。

#### (6) 开发绝缘子异常精检系统

绝缘子的破损和异物等异常在软件智能粗检的过程中多部分能被识别筛选出来，但是因为绝缘子结构异常的复杂性，检测结果仍然具有一定的不确定性，因而需要开发人工精检系统，针对软件智能精检的结果进行进一步的确认。在异常被确认存在后，利用本系统对图片做处理以便更清楚地查看图片、更好地分类异常信息。

#### (7) 技术框架搭建

本论文主要结合 HAAR+Adaboost 进行接触网绝缘子的识别与定位，在图像预处理过程中采用 OpenCV2.4.9 进行图像预处理，根据实验结果数据采用一定的阈值对图片去噪、提取相关方向的边缘信息等，在巡检图片批量处理过程中采用 OpenMP 技术对操作并行化。系统的开发基于 Visual Studio2013 开发平台，实现了软件智能粗检系统和人工精检系统两大系统模块，粗检系统主要用于从大量巡检图片中筛选出含有疑似异常的图片，精检系统主要用于对疑似异常进行进一步确认，将异常信息记录并提交至维护人员。

## 1.3 论文组织结构

本文主要介绍高铁接触网绝缘子智能检测系统的设计过程。论文共六章，分别为绪论、相关理论和技术说明、系统总体设计、详细设计与实现、系统测试与评价。其中每章主要包含以下基本内容。

第一章为绪论，简要说明论文的选题背景和论文基本结构。

第二章为相关理论和技术说明，主要介绍机器学习、图像处理、多核并行等相关方向的技术研究并展开讨论。

第三章为需求分析与总体设计。主要对本系统进行需求分析、探讨系统各功能模块、设计系统整体框架，并对数据库展开概要设计和数据库表设计。

第四章为系统模块设计与实现。描述了机器学习模块、图像预处理模块、异常识别模块和人工精检模块算法设计与功能实现，利用流程图、时序图、效果图等方式对设计方法进行展示。

第五章为实验与分析，分析描述了系统的测试方法和结果，在可维护性和可移植性上进行进一步的讨论。

第六章为本文的工作总结与展望。



## 第二章 相关理论和技术

### 2.1 Adaboost 机器学习方法

Adaboost<sup>[8][9]</sup>由 Yoav Freund 和 Robert Schapire 在 1995 年提出，单词来源于 Adaptive Boosting，取义为“自适应增强”，是一种优秀的 Boosting 算法，在机器学习领域得到了广泛的研究和应用。该方法能够将比随机猜想策略好的弱分类器加权组合提升为分类精度高的强分类器<sup>[10]</sup>。Adaboost 在很多方面体现出较好地性能，首先其匹配的准确度高，决策树的性能优异；其次，Adaboost 运算速度快，并且在生成级联分类器后不用再修正参数；最后，该方法不会过饱和，因而在很多场景下得到广大应用<sup>[11]</sup>。目前 Adaboost 算法被广泛的应用于人脸检测、目标识别等领域。

就算法实现角度而言，Adaboost 迭代算法包含以下 3 步，在本文第四章中将结合接触网的应用场景给出形式化描述：

- (1) 取一定比例的样本图片作为训练数据，并对样本数据的权值初始化。假设有  $N$  个训练样本，那在初始状态下，每个训练样本的权值被初始化为： $1/N$ 。
- (2) 训练弱分类器。本过程为迭代训练过程，在每一趟迭代训练中不断修正样本数据的权值以构造下一个训练集。假设某一样本没有被准确区分，就增加该样本的权值；而如果某一样本已经得到正确区分，则减小该样本点的权值。在此过程中，每一趟迭代都将对样本数据的权值加以更新，在此过程中，权重被更新后得到一个新的样本集，该样本集在下一迭代操作中将被用于继续训练分类器。
- (3) 对每个过程中训练得到的弱分类器进行加权，获得强分类器。在 Adaboost 算法的分类函数中会依据各个分类器的训练分类误差而赋以不同的权值。分类误差小的分类器获得更高的权值；相反，分类误差大的分类器将获得较小的权值。权值的大小决定了该分类器在分类函数中的作用，本步骤的意义是将分类误差不同的弱分类器赋加不同的权值。

### 2.2 多核并行技术

随着硬件水平的不断发展，多核已经成为当前计算机的基本配置。在此过程中，原有的基于单核的串行程序无法凸显多核处理的能力，需要对程序进行多核并行优化。在当前多核计算机得到普及的现状下，多核多线程技术能够合理利用计算机硬件资源，通过并行编程开发库将程序拆分成多个子任务，创建相应的多个线程处理子任务工作内容，并在不同的 CPU 中得到执行。这样的工作调度和

处理过程能够有效的协调计算机的 CPU 内核资源，实现负载的均衡分配，使得多核计算机的处理优势得到体现<sup>[12]</sup>。

多核 CPU 计算机的流行衍生出了多种并行编程模型。并行编程模型基于不同的计算机架构模型，在科研院校和商业机构中衍生出了众多多核编程框架。共享存储体系下的并行编程模型以共享变量编程模型为主，常用的包含 OpenMP 与 pthread 两种并行编程库，该类别编程模型具有易编程、单地址空间等特点。

OpenMP 主要通过编译制导语句完成对程序的并行化处理，其中编译制导语句指的是在程序中添加类似于注释的语句以告知编译器如果分配多核 CPU 资源等。该多核编程库是一种以线程为处理单位的编程库，使得编程人员能够达到对这种并行过程的完整控制<sup>[13]</sup>。OpenMP 的执行模型采用 Fork-Join 的形式：（如下图 2.1 单个并行执行域和图 2.2 多个并行域所示）。

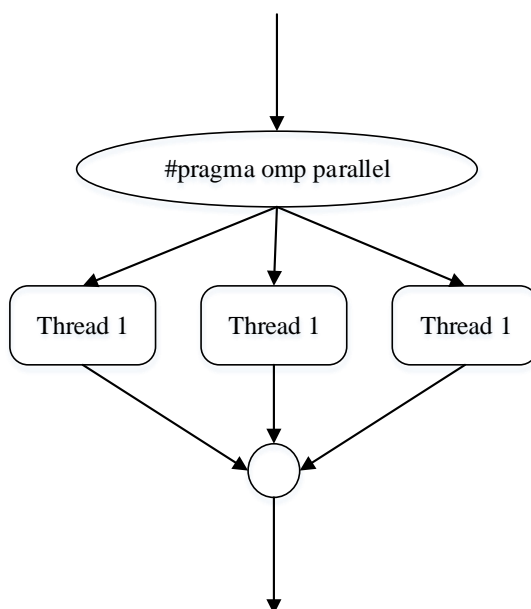


图 2.1 单个并行域

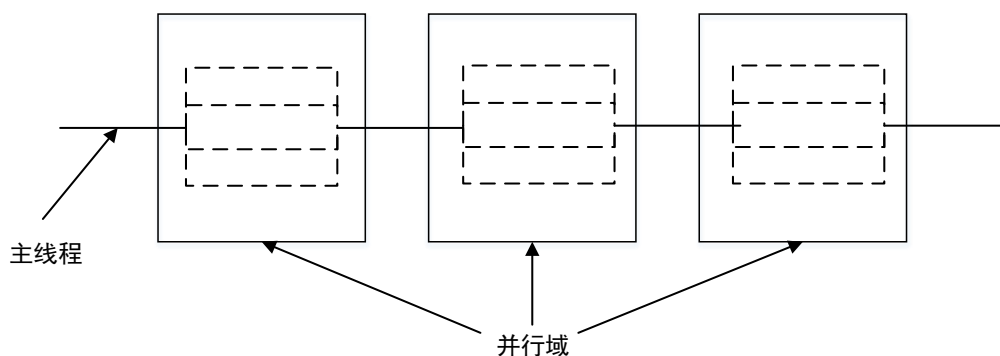


图 2.2 多个并行域

OpenMP 通过两种途径输出功能，其一为通过编译制导语句的途径，其二为通过运行时函数库的途径。另外，在调控程序执行过程中采用了环境变量的方式便捷地调控程序。

OpenMP 能够很好地解决兼容性问题。因为对于不同的编译器，可能出现编译制导语句不被支持的情况，此时该语句将被无视，进而保证程序能和串行代码一致友好地运行。在支持编译制导的语句，OpenMP 可以以很高的效率把串行程序并行化。只有在必要的情况下才会考虑使用运行时库函数。

Pthread 是一种共享存储的编程模型，是一种典型的多线程模型<sup>[14]</sup>。该模型提供了简单使用的 API，因此被广泛应用于 Linux 系统中。程序是保存于物理存储介质上的数据与算法代码，计算机系统需要创建进程来执行程序。系统给每个进程分配独立的地址空间，并用多个数据表维护进程的堆栈段、代码段和数据段。每个进程内可以创建多个线程，不同的线程之间共用进程的地址空间和数据，通过以上可以看出，进程的切换涉及到地址空间和众多数据表的切换，花销较大，而线程的启动和切换消耗的代价相对小很多，即线程开销小且通信机制方便。

## 2.3 图像处理与识别技术

### 2.3.1 高斯滤波

噪声点是图像处理过程中常见的内容，有效的降低被处理图片的噪声数据能够减小外界环境对图像处理效率的干扰，是图像预处理的重要一环。在图像处理领域，噪声点即为干扰计算机处理图像数据的无效像素点。例如，对于一张灰度图，如果该灰度图中的正常灰度分布用  $I(x,y)$  表示，则存在影响人类接收和识别图像信息的灰度分布被称为图像噪声。图像处理中常见的噪声有加性噪声、成型噪声、量化噪声和“椒盐”噪声等<sup>[35]</sup>。

高斯模糊技术在图像处理中常常被用来降低噪声点分布，用来减小图像噪声以及降低细节层次<sup>[15]</sup>。从数学运算的角度来说，高斯模糊亦即将图像中所有像素点的灰度值与高斯核函数进行卷积，所以高斯模糊对于图像来说就是低通滤波器的效果。

假设对于某单通道灰度图而言，其灰度值分布用  $I(x,y)$  表示。而高斯核函数可以用以下公式 2-1 表示：

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

那高斯模糊的处理过程为  $I(x, y)$  与  $G(x, y, \sigma)$  的卷积结果。处理过程如下公式 2-2 所述：

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2-2)$$

在高斯模糊的处理效果上，对于某个像素点而言，该像素点的灰度值通过高斯函数被重新分配，每个像素点更新后的灰度值为该像素点及临近像素点权值的加权灰度值之和。以该像素点为中心，在划定半径区域内的所有像素点被分配不同的权重，半径区域内的中心像素点权重最高，其他像素点根据与中心像素点距离远近赋予不同的权值。对于某一个噪声点数据，由于可能本身处理一个“孤立”的位置，将该像素点灰度值通过高斯进行卷积后，该像素点灰度值被降低甚至直接去除，进而达到了消除噪声点的作用。

在高斯卷积过程中，涉及到“临近”像素点的概念。理论上每个像素点的计算需要将正幅图片进行迭代运算。但是从实际处理效果上来讲， $3\sigma$  是处理图像卷积的临界值，大于该值的像素对图像的模糊过程起到的效果可以忽略不计。对于图像边缘区域  $3\sigma$  范围内的像素，由于其特殊性，可以直接忽略该像素不计或者将灰度值直接处理为 0。

### 2.3.2 Canny 边缘提取

图像的边缘是图像中灰度值发生突变的区域，是分隔两个图像灰度渐变区域的“分界线”，包含了能基本描述图像特征的基本信息，常被用于进行特征提取和物体识别，是多数图像处理过程所使用的数据基础。因此，图像边缘信息的提取对于图像分析、识别等处理至关重要，成为图像分析和识别领域的一个十分令人关注的课题<sup>[16]</sup>。其中，Canny 算法<sup>[17]</sup>被广泛应用于图像的边缘检测中。

Canny 算子常被用于边缘检测，是 John F. Canny 于 1986 年提出的一个多级边缘检测算法。基于 Canny 算子的边缘检测的实现算法是：通过计算图像的灰度值梯度变化图，如果某个像素点在其邻域内灰度值变化大，那在排除噪音的情况下该像素点可能位于图像边缘。图像边缘检测算法旨在对这种灰度值变化进行描述以确定图像中的边缘信息。

Canny 边缘检测算法包含以下 5 个步骤：

#### (1) 灰度化

图像的灰度化过程主要是针对 RGB 或者 RGBA 等多通道图像。在图像边缘提取过程中，需要将图像进行灰度化处理。图像的灰度化指的是将多通道图像经过一定的转换公式转化为单通道图像。灰度化过程可以简单通过一个公式进行转



化。以 RGB 图像为例，可以通过以下公式 2 - 3 将三通道图像转换为单通道图像 [18]。

$$I(x,y) = B(x,y) * 0.072169 + G(x,y) * 0.715180 + R(x,y) * 0.212671 \quad (2-3)$$

其中  $x,y$  为图像某像素点的坐标， $I(x,y)$  为灰度化后的图像灰度分布，即处理后的图像， $B(x,y)$  为 RGB 图像中的 B 通道数据， $G(x,y)$  为 RGB 图像中的 G 通道数据， $R(x,y)$  为 RGB 图像中的 R 通道数据。

## (2) 高斯滤波

高斯滤波是对灰度化后的图像进行去噪处理的过程，处理方法如 2.3.1 节所述。本过程的处理目标为去除噪声点的干扰。因为以下步骤 3 过程计算图像梯度，图像噪声点的存在对图像梯度的运算具有相当大的干扰作用，因此需要对灰度化后的图片实现进行滤波模糊化，以保证后期预处理得到一个较好的效果。

## (3) 计算图像梯度和方向

该过程是对图像进行信息增强的过程。边缘增强一般是通过计算梯度幅值来完成，处理时遍历图像所有像素点，计算某一像素点的邻域中灰度值的变化情况，获取邻域中灰度变化剧烈的像素。在运算方法上，采取比较简单的卷积算子，表达如下 2 - 4 所示：

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

其中  $S_x$ ， $S_y$  分别表示 x 向和 y 向的一阶偏导数，梯度幅值以及梯度方向的计算方法为如下 2-5~2-8 所示：

$$P[i,j] = \frac{(f[i,j+1] - f[i,j] + f[i+1,j+1] - f[i+1,j])}{2} \quad (2-5)$$

$$Q[i,j] = \frac{(f[i,j] - f[i+1,j] + f[i,j+1] - f[i+1,j+1])}{2} \quad (2-6)$$

$$M[i,j] = \sqrt{P[i,j]^2 + Q[i,j]^2} \quad (2-7)$$

$$\theta[i,j] = \arctan\left(\frac{Q[i,j]}{P[i,j]}\right) \quad (2-8)$$

## (4) 非极大值抑制

在以上过程中，图像梯度幅值矩阵反映了图像的梯度值分布，数值大表示梯

度幅值更大，但是这并不代表该像素点就是边缘点。寻找像素点局部最大值就是把非极大值点对应的像素灰度值置为 0，这样能去除很多非边缘点。

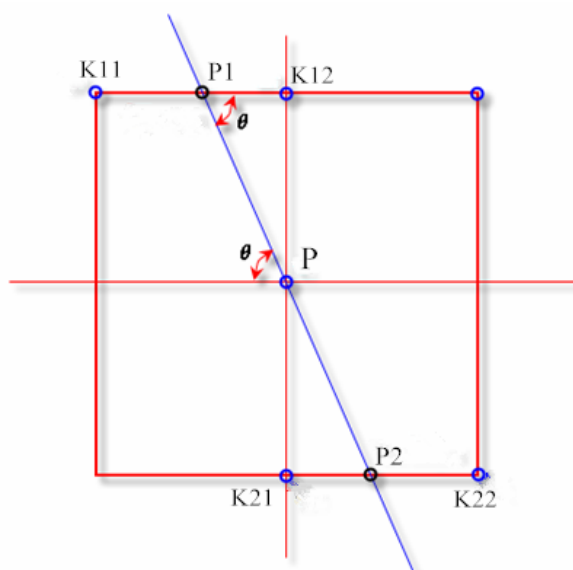


图 2.3 非极大值抑制

在图 2.3 中展示了以 P 点为中心的邻域范围内非极大值抑制处理描述图。在进行非极大值抑制之前，需要判断 P 像素是否是邻域内梯度幅值极大值。图 2.3 中标示的蓝线为 P 像素的梯度方向，在梯度放上分布着该邻域内的局部最大值，因此判断 C 像素是否是局部最大值需要将 C 像素点与梯度方向上其他交汇点 P1 和 P2 的灰度值进行比较。如果处于同一梯度方向的 P1 或 P2 两点的值大于 C 像素点灰度值，则可以判断 C 并不是区域内的局部最大值，进而能确定 C 点不是图像边缘上的像素。

在实际应用的过程中进行非极大值抑制的过程中，可能要处理的同一梯度方向的两个点不在 8 个像素点邻域中，造成无法直接获取上述 P1 和 P2 两点的灰度值。为了有效获取该两点的值，需要结合 P 像素点及周围像素点的灰度值对 P1 和 P2 进行线性插值。在上述图 2.3 中，根据 P11 和 P12 对像素 P1 进行插值，根据 P21 和 P22 对像素 P2p 进行插值，在此过程中需求解梯度方向 theta 值。

在完成非极大值抑制处理后的图像依然包含很多噪声点造成的非边缘数据，该图是一张只包含灰度值为 0 和 128 的灰度图，其中非边缘像素点的灰度值取值为 0，上述处理过程中求得的局部极大值像素点灰度值取值为 128。为了进一步处理本过程中因为噪声造成的干扰，需要在此基础上作额外的处理。

##### (5) 双阈值算法检测和连接边缘

在检测图像边缘信息的过程中会产生很多非边缘数据，Canny 边缘检测算法

采用高阈值、低阈值“双阈值法”解决取出非边缘数据。高阈值用于确定像素点数据边缘数据，过滤噪声点等假边缘，但高阈值过滤非边缘信息可能导致过滤部分真实的边缘信息，造成边缘轮廓不闭合，因此需要采用低阈值策略恢复边缘数据。在现有生成的轮廓中，处理当前轮廓端点的过程中继续判断端点的邻域内其他像素点灰度值大于低阈值，满足则将该像素点标识为边缘像素，进而获得完整、闭合的边缘信息。

### 2.3.3 Hough 直线提取

在图像处理过程中，像素点灰度值的规律化分布在整体图像中体现成一定的形状，直线是较为突出的一种。提取图像中的直线特征是计算机视觉计算中常见的处理过程。霍夫变换<sup>[19]</sup>是用来检测直线特征的主要方法之一，霍夫变换的算法原理是利用点和线之间的对偶性，把在图像二维空间中提取直线问题处理成在参数空间中提取点的问题，进而在参数空间进行数学上的叠加统计完成直线提取<sup>[20]</sup>。霍夫变换提取图像中的直线信息通过以下三个步骤来实现：

- (1) 完成图像空间中特征点的霍夫变换并对参数空间中每一参数累积采样点。
- (2) 在参数空间进行峰值检测。
- (3) 检验根据峰值参数推测出的直线。

霍夫变换算法的优势是能很好克服噪声的干扰<sup>[21]</sup>，能在低信噪比下检测出直线，其劣势是因为全搜索，有较大的计算需求和空间存储需求。

### 2.3.4 图像相似度对比

图像的相似度对比指的是通过一定的指标量化衡量两个图片之间的匹配相似程度。现有的图象相似度对比办法多种多样，常见的比较办法有以下几种。

#### (1) 直方图匹配

对于一副灰度图而言，每个像素的灰度值分布在[ 0-255 ]之间，而图象的直方图指的是该灰度图每个强度值出现的频率。同样的，对于 RGB 的彩色图象，直方图表示 R、G、B 三通道分别的直方图来共同显示。

直方图匹配<sup>[22]</sup>指的是对于图像 A 和图像 B，分别计算二者的直方图，记为 HistA，HistB；紧接着分别将直方图归一化，将直方图作为一维向量计算二者之间的相关系数。直方图匹配是计算图像相似度的常用办法，因为他能有效的解决不同分辨率图像的相似度问题，而且计算量小，处理速度快。

与此同时，直方图对比也有显而易见的以下缺点：直方图对比是通过图像中的灰度值分布概率来对比，反映的是整体上的“灰度”分布相似度，忽视了细节上局部的相似度。例如，可能出现一幅图片的局部在图像范围内发生位移，在图像

背景颜色单一的情况下，位移后生成的另一张图片和原图直方图相似度很高。

## (2) 数学上的矩阵分解

在图像处理编程过程中，图像常用类似矩阵的概念表示，换言之，矩阵可以完整地描述图像信息。而对于矩阵而言，矩阵可以分解为多个矩阵的乘积，称为“矩阵分解”。矩阵分解得到多个矩阵可以被用于描述图片，通过对比部分特征的对比等同于对图像进行相似度对比。常用的矩阵分解办法有 SVD 和 NMF 分解等等。

基于矩阵分解的相似度对比最终用矩阵的奇异值表示。矩阵的奇异值特征具有良好的性能，能有效地解决图像处理中因角度偏差、位置偏差等造成的图像差异，在图像处理领域中有着大范围的使用场景。对图像进行奇异值分解有较多优势：能对图像特征空间进行降维；能减少噪声点对图像处理造成的干扰；能很好的描述图像特征。

## (3) 基于特征点的图像相似度计算

图像的特征点指的是图像中能很好描述图像信息的像素点，如拐点等，对计算机视觉计算起着至关重要的作用。在图像处理中常见的特征点有 Harris 角点<sup>[23]</sup>、SIFT<sup>[24]</sup>特征点等。由于特征点是图像信息的体现，因此通过对比图像特征点数据能间接地比较图像整体的相似度。图像的相似度与相似特征点的数目呈正相关关系。

SIFT (Scale-invariant Feature Transform 尺度不变特征) 是描述图像特征的一种算法。该特征具有旋转不变性和尺度不变性，被广泛应用于图像视觉处理中，如目标物体识别、建立 3D 模型、手势检测等<sup>[34]</sup>。

## 2.4 本章小结

本章介绍了在建设本系统时所用到的关键理论和技术，并对这些技术的基本原理和使用方法展开说明。本系统的应用需要处理大量的图片数据，因此结合当前多核并行技术在开发各个环境进行优化加速。与此同时，Adaboost 机器学习方法对绝缘子的识别定位提供了快速有效的识别方案；本章也对图像处理过程中频繁涉及到的高斯模糊、图像边缘提取、直线提取和图像相似度对比办法展开讨论。

## 第三章 需求分析与总体设计

### 3.1 需求分析

#### 3.1.1 需求概述

接触网绝缘子异常检测系统的建设，旨在为各铁路局供电段的工作人员提供设备异常预警，减小因为绝缘子异常为铁路列车运行带来安全隐患。

绝缘子是接触网中的一种绝缘设备，能够在架空输电线路中起到重要作用，用来支持和固定母线与带电导体、并使带电导体间或导体与大地之间有足够的距离和绝缘。绝缘子异常的主要体现有：绝缘子细片缺失，夹杂异物等不良状态。本系统的异常检测也主要针对以上异常进行讨论，其他状况下的异常需要在后续的软件更新做出新一步的识别。

对于铁路局供电段而言，工作人员通过在运行的铁路列车上架设高速摄像机，不断随着列车行驶过程拍摄铁路照片并存储在存储设备上。在待巡检线路上往返行驶一个周期后，线路检修人员将存储设备图片数据保存至工作用计算机，并通过打开该存储设备上的巡检图片逐张查看并记录绝缘子异常存在情况。该异常检测方法依靠人力来对巡检图片做缺陷检测，因为图片数量巨大，工作人员的工作效率以及异常检测的准确度面临巨大考验。

本系统的需求功能结构图如图 3.1 所示。

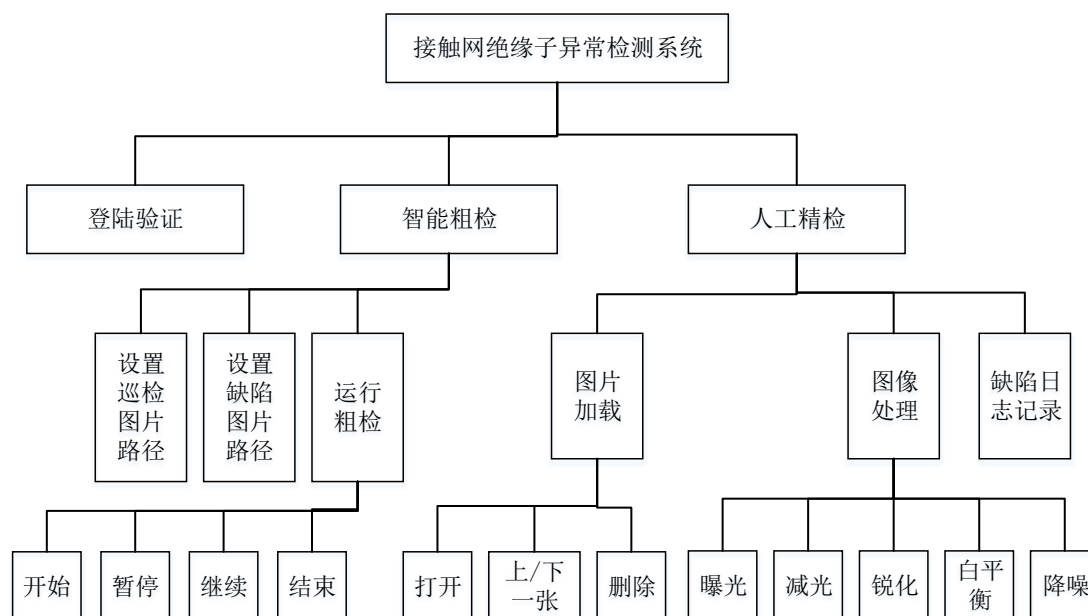


图 3.1 系统需求功能结构图

工作人员登陆系统后，可以选择智能粗检或人工精检功能。智能粗检针对大量巡检图片作绝缘子异常检测，工作人员可以选择巡检图片的存放路径、存放疑似异常图片的路径等。开启智能粗检过程后，计算机将对巡检图片中进行快速异常检测，过程中工作人员无需参与决策，工作人员也可选择“暂停”、“继续”、“结束”等操作对智能粗检进行干预；另，工作人员可以选择进行人工精检子系统。该系统主要针对粗检得出的疑似存在异常图片进行进一步确认，系统提供的操作至少包含图像加载、删除、图像处理等操作以便工作人员对异常进行进一步的确认。除此之外，系统的建设还包含以下几点要求，即：

(1) 因巡检图片存在多级目录，在将疑似异常图片保存到目标目录时应创建与寻见图片多级目录一致的相对路径。即智能粗检判断存在疑似异常的图片 Errors.jpg 在巡检图片目录下的路径为“%巡检图片根目录%/子目录 A//子子目录 1/Errors.jpg”，则智能粗检结果应将该图片存储于“%疑似异常根目录%/子目录 A//子子目录 1/Errors.jpg”。

(2) 智能粗检系统在识别绝缘子异常图片时，应保证过滤的绝缘子正常图片比例不低于 70%。

(3) 智能粗检系统在识别到存在疑似异常图片时计算机报警，并且系统能实时显示计算机粗检工作进度。

(4) 人工精检系统中要求默认打开智能粗检设置的存放疑似异常的工作路径。

(5) 系统应具有缺陷日志记录功能。工作人员通过系统确认存在绝缘子异常状态后，可以通过系统创建缺陷日志档案。

(6) 系统应该是通用的，能稳定运行于 Windows XP、Win7、Win8 等操作系统。同时也有效利用计算机多个核心的计算能力。

### 3.1.2 设计原则

在计算机计算能力逐渐提高的背景下，图像处理也在理论基础和应用技术上取得了突破成果。在图像识别水平大大提高的前提下，各行各业也通过图像处理技术获得了前所未有的便捷，如火灾险情的识别<sup>[25]</sup>被用于及时处理灾情、车牌识别<sup>[26]</sup>被广泛应用于停车场管理、自动指纹识别技术<sup>[27]</sup>被广泛应用于门禁和考勤等系统中、白细胞显微图像识别技术<sup>[28]</sup>被应用于生物医疗场所中。

在当前的计算机系统中，多核技术被广泛应用到 CPU 的设计中，4 核甚至 4 核以上的计算机逐渐取代了原来的单核 CPU，因而当前计算机上一个 CPU 普遍具有多个微处理器核心。为了充分利用多核计算机的优势，开发系统的过程中应使用多核多线程技术以完成高效的图像并行处理。系统拥有以下几个突出特点：

(1) 系统开发周期短

多核编程相对于采用集群计算机进行并行编程在开发效率上有很大的提升。由于集群计算机的处理器分布在不同的计算机中,通过网线连接。为了使处理器之间协调工作,需要考虑处理器之间的通信问题<sup>[29]</sup>,而采用多核处理器进行开发的时候,只需要解决并行方面的问题。

### (2) 系统开发成本低

传统计算机集群购买和维护成本较高,相比而言,多核计算机是当前计算机的基本配置,能基本满足接触网绝缘子异常检测系统的开发和应用需求。

### (3) 系统延展性高

系统的实现依赖于软件的实现,与硬件配置关系不大。对于 OpenMP 而言,软件编程的开发过程可以保证程序能在单核或多核计算机上平稳运行,因此系统的延展只需要修改程序,不需其他额外的开销。

## 3.1.3 系统目标

在与结合铁路局供电段的相关技术人员进行深入探讨后,结合上述功能需求,归纳总结出以下几点建设目标,即:

(1) 绝缘子识别的独立性。系统通过 Adaboost 级联分类器进行绝缘子的识别与定位,为保证在未来能对级联分类器不断优化改进,系统应抽象独立出相关接口保证系统的应用能简易替换旧版本的级联分类器。

(2) 日志记录的完整性。本系统在确认巡检图片中绝缘子存在异常时需要记录该缺陷的详细信息,系统应保存每次异常数据,方便日后对接触网异常处理作分析统计工作。

(3) 界面操作的简单性。系统应保证用户能根据界面提示熟练操作系统的运行,对于图像处理的专业名词应予以相应提示。

(4) 系统运行的高效性。系统的运行处理数以 10G 以上的图片,需要保证系统运行时间在每小时处理 10G 以上图片,并且系统耗费内存空间和磁盘空间小。

## 3.1.4 功能分析

本文在结合多核并行编程技术、机器学习技术与图像处理技术的基础上,构建基于多核并行技术的高铁接触网绝缘子异常检测系统。根据它完成的工作,主要分为以下几个部分:机器学习模块、图像预处理模块、异常识别模块与人工精检模块。除此之外,多核并行技术嵌套在多个模块操作中,为系统运行效率提供速率保障。

### (1) 机器学习模块

机器学习模块主要在样本图片库中运行 Adaboost 算法提取图像 HAAR 特征,

以接触网巡检图片中常见的云彩、铁轨、树木等背景作为负样本，以绝缘子作为正样本进行训练，得到接触网绝缘子级联分类器，该分类器用.xml 文件保存在本地磁盘中供后续模块调用。系统的用例图如图 3.2 所示。

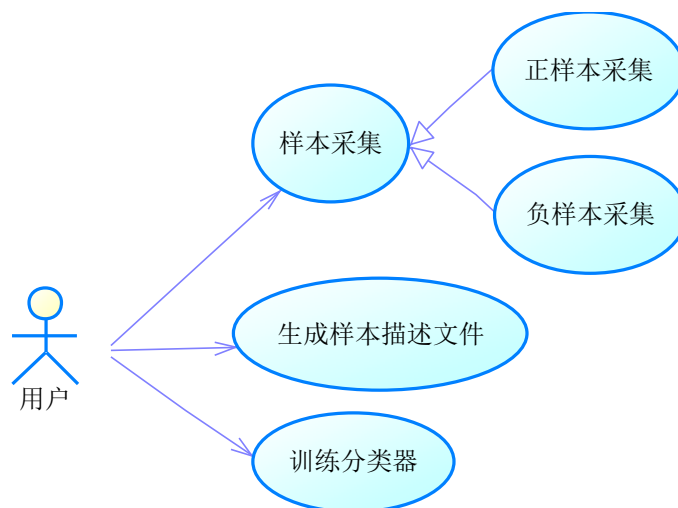


图 3.2 机器学习用例图

## (2) 图像预处理模块

图像预处理模块包含两部分，其一为在数量巨大的接触网巡检图片中过滤因为曝光过度、亮度不足等因素造成巡检图片无法被正常检测的图片，以此减小无用的检测以提高系统效率；其二为为图像去噪、提取图像边缘特征、提取图像直线特征等。系统的用例图如图 3.3 所示。

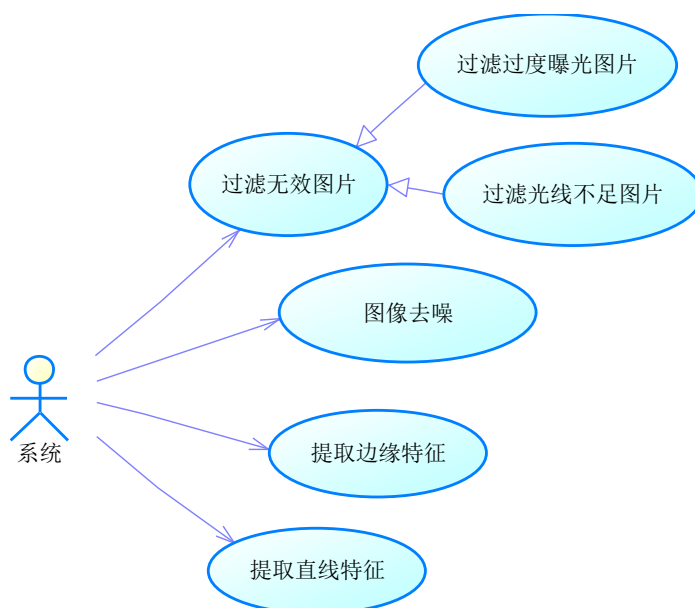


图 3.3 图像预处理用例图



### (3) 异常识别模块

机器学习模块和图像预处理模块为异常识别模块提供了接触网绝缘子区域图片, 异常识别模块在此基础上利用绝缘子区域图像分布的规律性判断是否处于不良状态。系统用例图如图 3.4、图 3.5 所示。

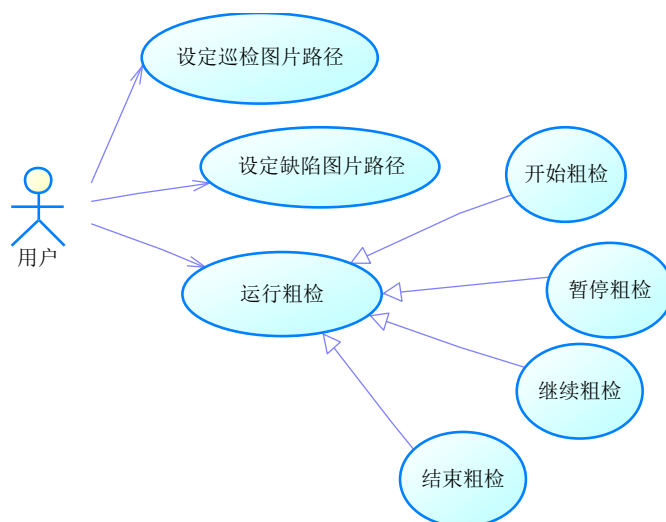


图 3.4 异常识别模块用例图

### (4) 人工精检模块

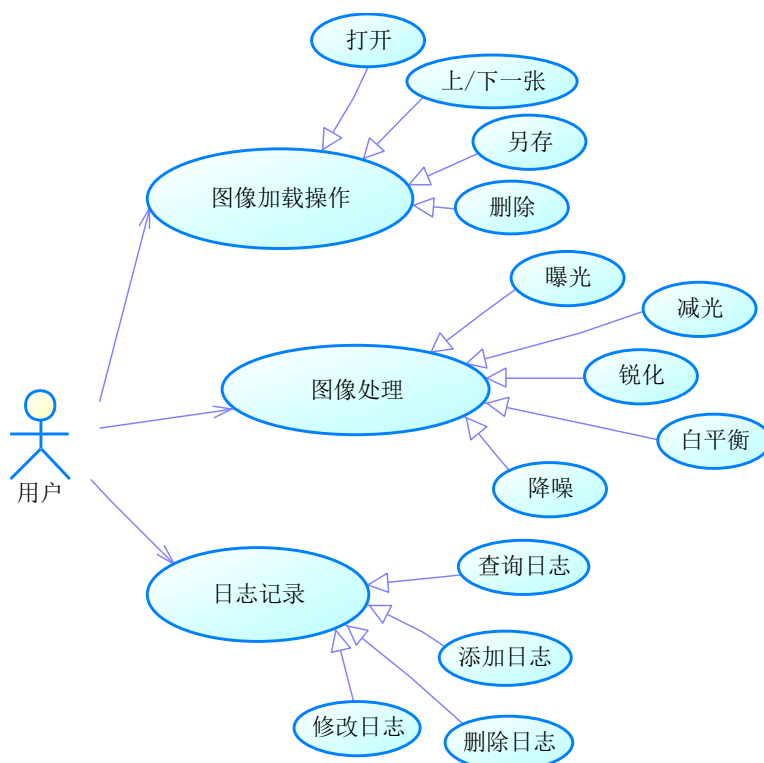


图 3.5 人工精检模块用例图

人工精检模块为工作人员确认疑似异常提供了有效工作，用户通过该模块对智能粗检系统获得的疑似图片进行进一步确认。人工精检模块主要提供对巡检图片的查看和清晰化编辑，并为确认存在绝缘子缺陷的图片做缺陷记录，包含绝缘子异常内容、位置、时间、责任人等信息进行相应的处理。该系统用例图如图 3.5 所示。

#### (5) 多核并行检测实现

在绝缘子的异常检测过程中，对图像的遍历读取和处理耗费了大量的时间。在当前多核 CPU 计算机已经普及的时代背景下，将计算机的计算性能合理利用在图像处理、数据操作等方面中进一步提高系统运行效率。

## 3.2 系统整体框架

本系统包含机器学习模块、图像预处理模块、异常识别模块、人工精检模块等四个模块。系统的体系结构图如图 3.6 所示。

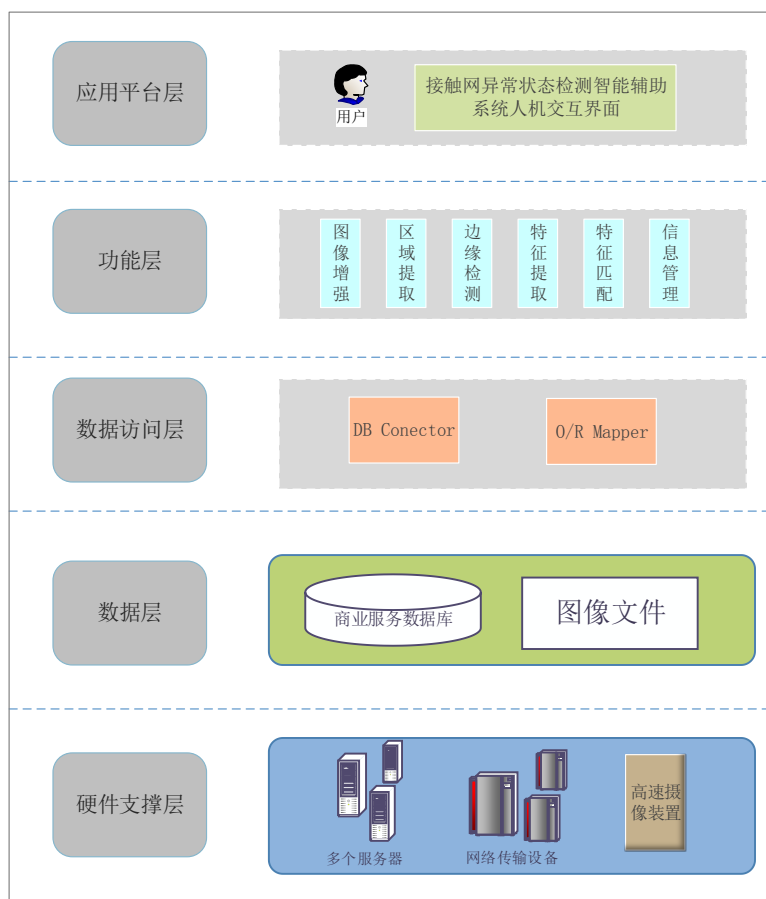


图 3.6 系统体系结构图

机器学习模块主要完成对接触网绝缘子在图片中位置的查找与定位，为后续

的异常快速识别提供基础；图像预处理模块主要完成对图像的去噪、边缘提取、无效图片过滤等操作；异常识别模块主要基于机器学习模块生成的绝缘子位置，与标准绝缘子结构图片对比进而得出存在疑似异常的图片。人工精检模块主要对机器产生的疑似异常图片进行人工判别，模块提供图片的分析和简单操作功能。

在图片数据操作过程中如下图 3.2 所示。用户在进入系统后，可以根据提示选择进行计算机智能粗检子系统或人工精检系统。智能粗检系统检测所有接触网巡检图片，找出存在疑似异常的图片；人工精检系统对粗检系统筛选出的疑似异常图片进行缺陷确认和记录。

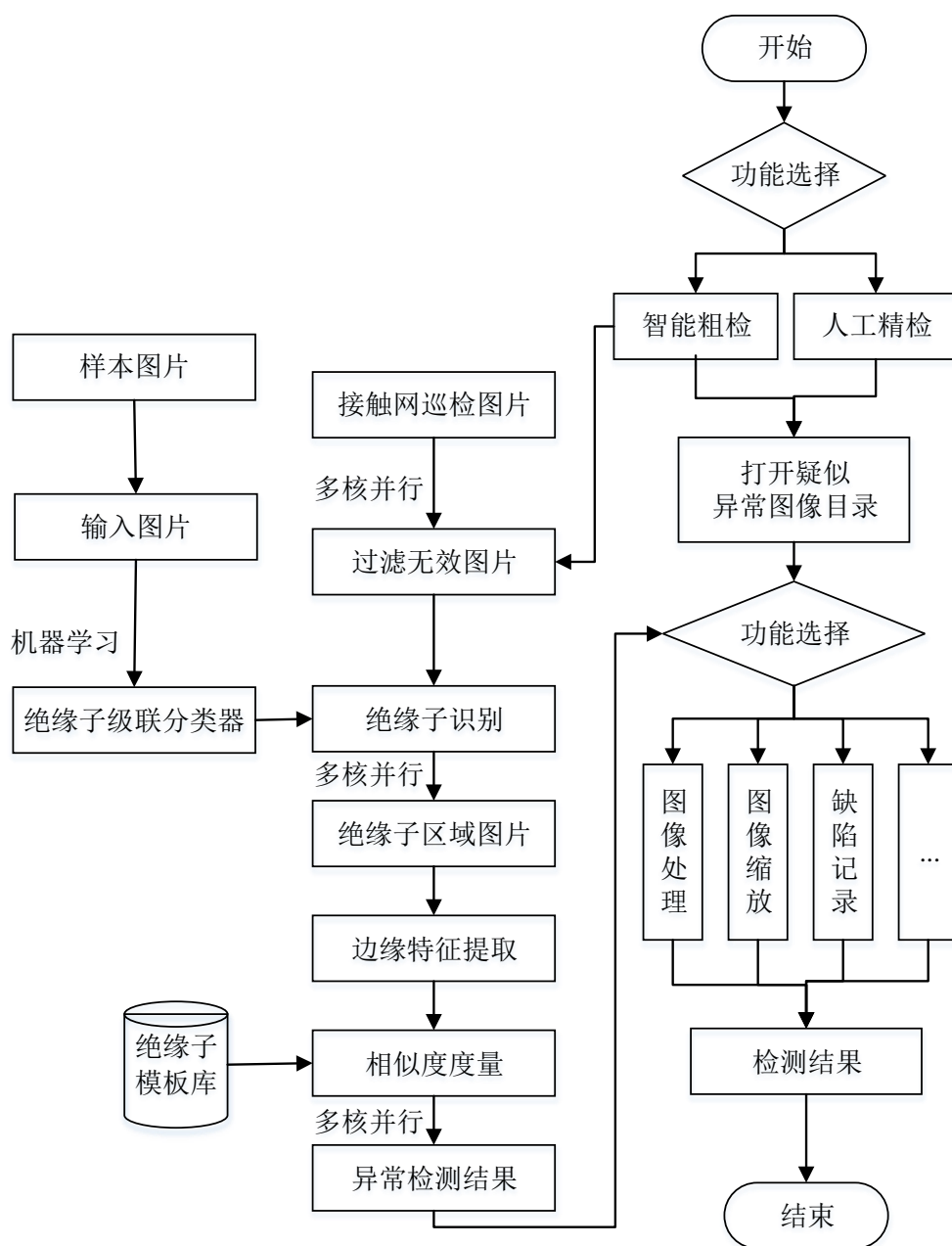


图 3.7 数据流程图

智能粗检系统在运行前，机器学习模块通过样本图片对绝缘子形状进行机器学习生成绝缘子级联分类器。智能粗检系统的运行将结合该分类器，对接触网巡检图片进行绝缘子识别，识别成功后对于绝缘子模板库作相似度对比，得出存在疑似异常的图片。

人工精检系统处理存在疑似异常的图片，提供处理该图片的功能。包含图像处理、图像缩放、缺陷记录等功能。工作人员可以将粗检系统的检测结果进行进一步确认，确认结果交付接触网维护人员。

### 3.3 系统数据库设计

#### 3.3.1 数据库概念设计

数据库概念结构设计是整个数据库设计的关键，在对接触网绝缘子异常检测系统的需求分析基础上，根据软件工程思想设计出满足绝缘子异常检测系统用户的各种实体，以及它们之间的逻辑关系。E-R图是概念模型设计的典型方法，即用实体、联系模型表示。E-R图包含三个基本成分：实体、联系、属性。系统功能规划从功能控制角度较为清晰的展示了系统所包含的模块和所应实现的行为。系统的数据结构则提供了数据存储的模式以及数据之间的关联性。具体来说系统的数据结构是指的数据在数据库系统中的存储结构，本系统中采用目前较为流行的关联型数据库，数据集由存储各种不同类型数据的数据表构成。分析前述各个功能模块的行为逻辑和功能不难发现，各个功能虽然相对独立，但又有着不同程度的关联。

针对接触网绝缘子异常检测系统而言，需要对供电段工作人员用户的需求进行调研和分析，得出如下的需求信息。

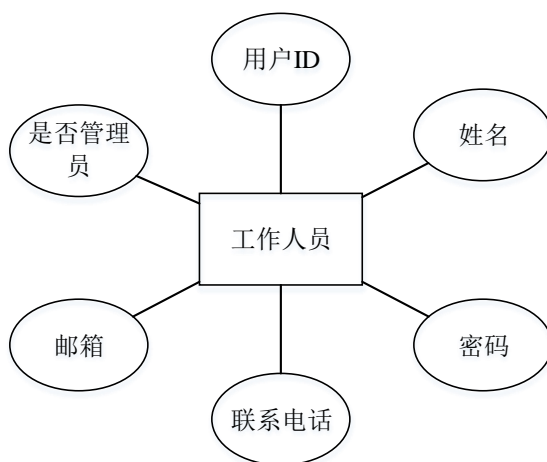


图 3.8 工作人员实体图

工作人员对系统的工作流程进行管理，工作人员需要对业务操作进行负责，所以需要用户名和密码登陆系统，以保证安全性。除此之外，用户需要额外的身份信息用户联系，对此设计如图 3.8 所示的实体图。

在系统运行过程中，数据的传递以图片的形式。工作人员在判断绝缘子异常存在后需要将缺陷日志进行记录和保存。缺陷日志的设计实体图如图 3.9 所示。

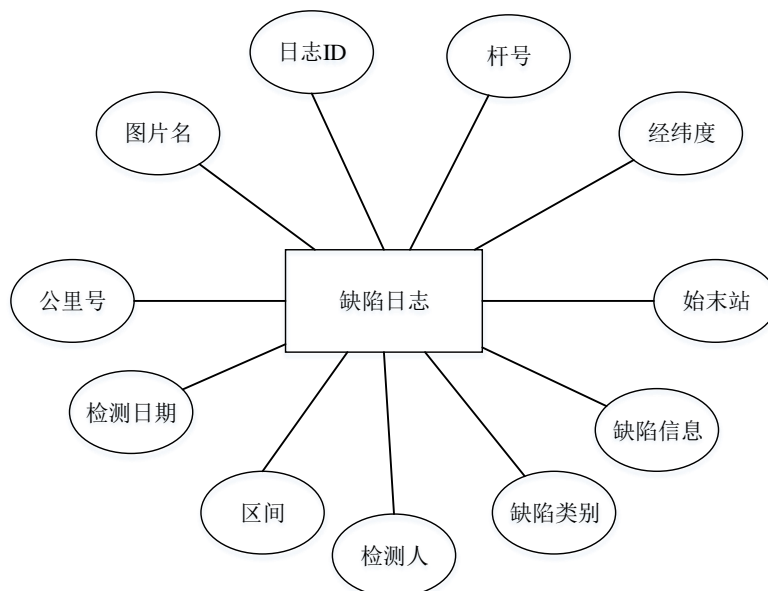


图 3.9 缺陷日志实体图

为了保证缺陷记录可追踪，建立缺陷检测相关人员负责制，也保证日志处理过程可追踪，建立缺陷处理实体图用于保存缺陷处理进行信息，实体图如图 3.10 所示。

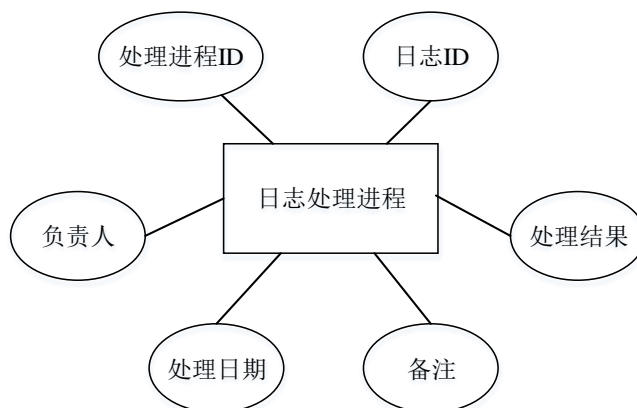


图 3.10 日志处理进程实体图

### 3.3.2 数据库表设计

本系统的设计主要体现在智能粗检模块，对数据库的运用旨在保存用户信息进行身份验证，另保存日志信息便于后续工作记录查询和任务责任追踪。系统数据库保存信息较少，采用开源轻量级 MySQL 数据库作为数据存储工具，此数据库包含 3 个表。

#### (1) 用户信息表

用户信息表用于保存用户基本数据，用于用户登录验证和工作人员之间信息查询。该表数据结构设计如表 3.1 所示。

表 3.1 用户信息表

字段	数据类型	长度	是否为空	是否为主键	说明
user_id	bigint	20	N	Y	ID
name	varchar	40	N	N	姓名
password	varchar	20	N	N	密码
Tel	varchar	13	N	N	联系电话
Email	varchar	40	Y	N	邮箱
is_admin	int	2	N	N	是否管理员

#### (2) 缺陷日志表

表 3.2 缺陷日志表

字段	数据类型	长度	是否为空	是否为主键	说明
report_id	bigint	20	N	Y	ID
detect_date	timestamp	0	N	N	检测日期
img_num	varchar	40	N	N	图片名
pole_num	varchar	10	N	N	杆号
km_mark	varchar	10	N	N	公里号
longi_lati	varchar	40	N	N	经纬度
start_dest	varchar	40	N	N	始末站
site	varchar	40	N	N	区间
content	varchar	200	N	N	缺陷信息
type	varchar	40	N	N	缺陷类别
detector	varchar	40	N	N	检测人

缺陷日志表用于记录绝缘子缺陷的详细信息，包含异常内容、所在杆号和列车行驶区间等等。该表数据结构设计如表 3.2 所示。

### (3) 日志处理进程表

日志处理进程表用于跟踪记录绝缘子处理进程，包含检测人、负责人、处理日期、处理结果、备注等信息。该表数据结构设计如表 3.3 所示。

表 3.3 日志处理进程表

字段	数据类型	长度	是否为空	是否为主键	说明
process_id	bigint	20	N	Y	处理进程 ID
report_id	bigint	0	N	N	缺陷日志 ID
result	varchar	100	N	N	处理结果
date	timestamp	0	N	N	处理日期
leader	varchar	40	N	N	负责人
remark	varchar	100	N	N	备注

## 3.4 本章小结

本章结合铁路局应用实际开展需求分析，首先以用例图的方式从用户视角描述系统功能需求，其次对系统设计思想和整体框架展开介绍，最终用实体图和设计表格的方式对数据库设计进行说明。





## 第四章 系统模块设计与实现

在第三章系统需求分析与总体设计的基础上，结合所选的系统软硬件平台和开发工具，本章实现了对接触网绝缘子异常检测系统的具体设计与实现，并以模块为单位对系统开发进行探讨，然后进行多核并行化设计。

### 4.1 机器学习模块

本文基于 Adaboost 算法级联分类器对接触网绝缘子进行识别和定位。对于级联分类器，系统采用对强分类进行级联。而强分类器是由不同的弱分类器根据权值组合而成。

#### 4.1.1 级联分类器训练过程

##### (1) 正、负样本集的采集

训练绝缘子分类器需要采集接触网绝缘子的正负样本集。正样本集指图像中包含的绝缘子区域，包含不同形状、大小和方向的绝缘子区域图像；负样本集指的是不包含绝缘子，一般取巡检图片中常见的背景元素，如云彩、树木、建筑、铁轨等。在正样本采集过程中需确保标定的正样本长宽比例一致，即以接近正方形的矩形去标定待识别的物体。正样本大小取  $20 \times 20$ ,  $28 \times 28$ ,  $36 \times 36$  等。负样本的选取需保证样本大小不小于正样本，一般取  $40 \times 40$ ,  $60 \times 60$  和  $100 \times 100$  等。

##### (2) 训练过程的实现

绝缘子级联分类器的训练方法包含四个步骤：首先提取巡检图片 HAAR 特征，进一步地将 HAAR 特征转化成 Adaboost 弱分类器，进而将多个弱分类器划分不同权值获得强分类器，最终级联众多强分类器获得级联分类器。训练过程如图 4.1 所示。

在进行 HAAR 特征提取的过程中，为了提高图片运行的效率，使用了积分图<sup>[30]</sup>的概念。积分图于 Paul Viola 等人提出，并非视觉可见的图片。积分图是对应于某一特定灰度图而言，点(x, y)的值为该对应灰度图的(x, y)与(0, 0)点围成的矩形局域内所有像素的灰度值之和。即：假设存在存在灰度图 I，则存在对应的积分图 I'，二者等宽等高，并且积分图计算办法如下 4-1 所示：

$$I'(x,y) = \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y I(i,j) \quad (4-1)$$

在实际计算过程中，以上计算方法会导致大量重复计算而降低系统运行速度，考虑到计算的特殊性，积分图的计算方法可以如以下公式 4-2 简单求得：

$$I'(x,y) = \begin{cases} I'(x-1,y) + I(x,y), & \text{if } y = 0 \\ I'(x,y-1) + I(x,y), & \text{if } x = 0 \\ I'(x-1,y) + I'(x,y-1) - I'(x-1,y-1) + I(x,y), & \text{else} \end{cases} \quad (4-2)$$

在提取图像 HAAR 特征的过程中，积分图的概念使得特征的提取时间效率有了巨大的提升。HAAR 特征包含：边缘特征、线性特征、中心特征和对角线特征<sup>[31]</sup>，以上特征组成如图 4.2 所示的特征模板。在图示中的特征模板中黑白两色区域标识了原图参与运算的像素区域，分别计算两种颜色覆盖像素点区域的灰度值之和，定义特征模板的特征值为二者计算结果之差。HAAR 特征反映了图像灰度变化情况。为了避免灰度值重复迭代计算，因此在计算前需要生成灰度图对应的积分图，利用积分图像素的值将能快速计算图像 HAAR 特征。

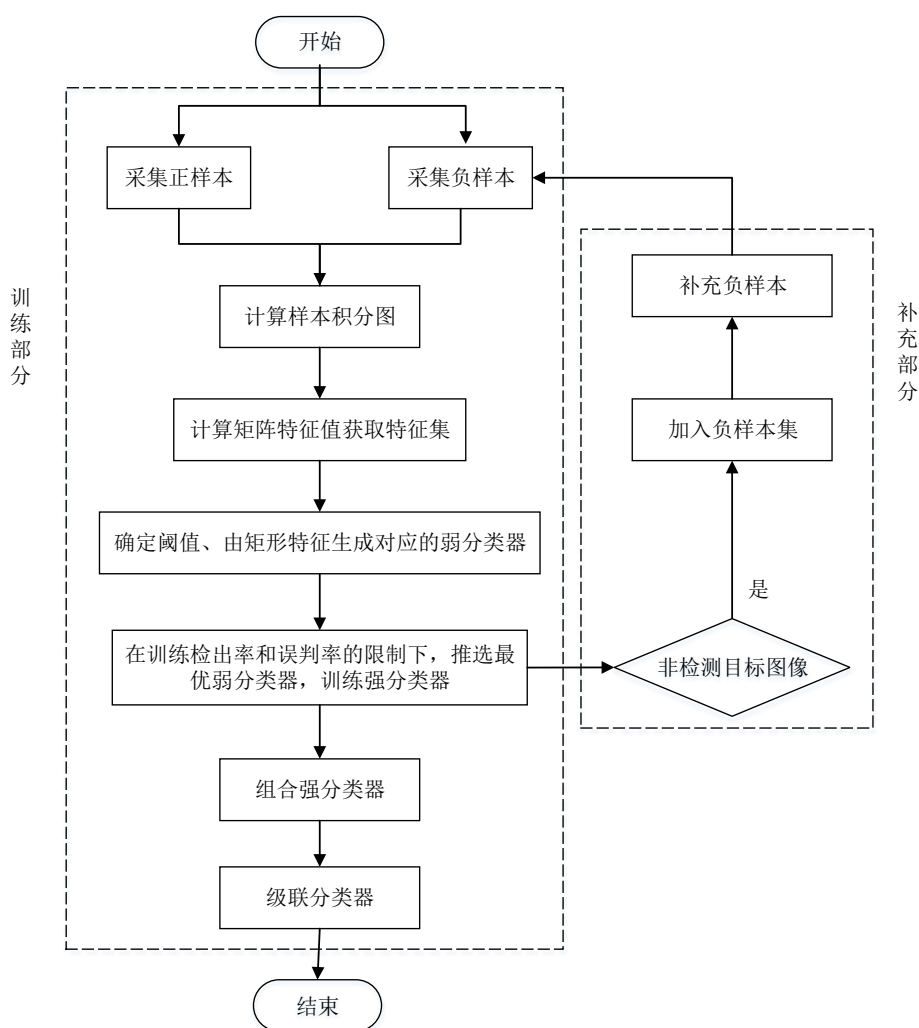


图 4.1 HAAR 特征训练级联分类器框架图

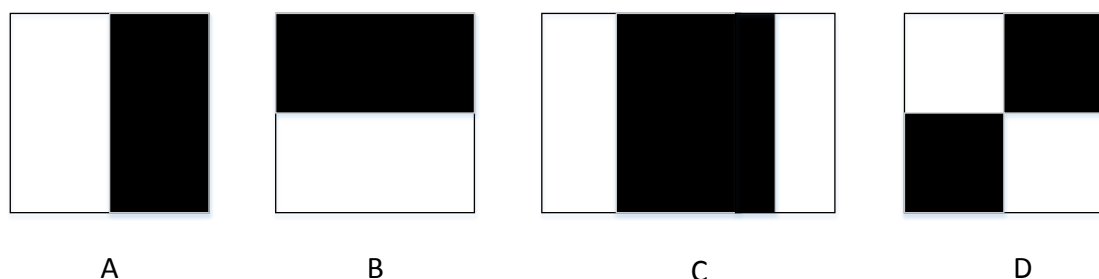


图 4.2 HAAR 特征模板

### 4.1.2 级联分类器的使用

Adaboost 训练出来的弱分类器对绝缘子的识别效果不佳，无法直接作为绝缘子的分类器，因而需要将弱分类器作出判断赋以不同的权值，在不同权值的影响下形成强分类器以提高识别的性能。多个强分类器的级联形成绝缘子强分类器，将极大提升分类器的性能。若干个强分类器分级串联在一起形成的级联分类器，级数越高越严格。接触网结构中非绝缘子结构在图像中被识别的难易程度有别，但在多个级联的强分类器中将不断被排除，最终算法识别出图像中绝缘子所在位置。

在每一级强分类器中，算法识别的过程可以让多数正样本通过，同时过滤大部分负样本。因此在每一级分类器的检测中，相当大部分的非目标物体区域被排除，待检测正例数目逐渐减少，极大地加速图像物体识别过程。

由于本系统采用离线的方式对绝缘子进行检测，即利用事先生成的绝缘子级联分类器扫描巡检图片识别绝缘子位置，因此需要设计绝缘子检测机制，以便进行绝缘子图像识别。在绝缘子训练过程中需要设定样本的大小，以趋近于图像中实际大小为主，在处理不同分辨率图像时需要将图像处理成同一分辨率尺度下处理，该参数的设置也影响到了弱分类器识别物体的大小。但是在绝缘子实际检测过程中，由于拍摄距离和角度的原因，绝缘子在图片中的大小不尽相同。以此可知，绝缘子的识别和检测方法需要级联分类器能保证在图片中尺寸不一的绝缘子能得到识别。常用的多尺度检测方法有两种<sup>[32]</sup>：其一为同时变换绝缘子弱分类器的权值及分类器的尺寸，该方法识别耗时少，但处理复杂；其二为在多个尺度下采集图像信息，抽取样本，该方法识别耗时多，但处理简单。

### 4.1.3 识别与定位绝缘子

绝缘子识别与定位的流程图如图 4.3 所示。

第一步是把图像转换为灰度图像。在 OpenCV 中可以直接在读取图像函数中传入相关参数以直接读入灰度图。在需要程序员处理图像将 RGB 三通道图像转换为灰度图时，可以利用以下公式 4-3 将 RGB 三通道图像转换成灰度图单通道图像。其中 Gray 为灰度图，R 为 RGB 图像的 R 通道，G 为 RGB 图像的 G 通道，B 为 RGB 图像的 B 通道。

$$\text{Gray} = R * 0.299 + G * 0.587 + B * 0.114 \quad (4-3)$$

第二步是遍历灰度图，统计每张灰度图中每一个像素点左上角灰度值的总和，并保存在另一张“灰度值统计图”中。该过程即获得原图对应的积分图的过程，积分图的概念在本文 4.1.1 有介绍。

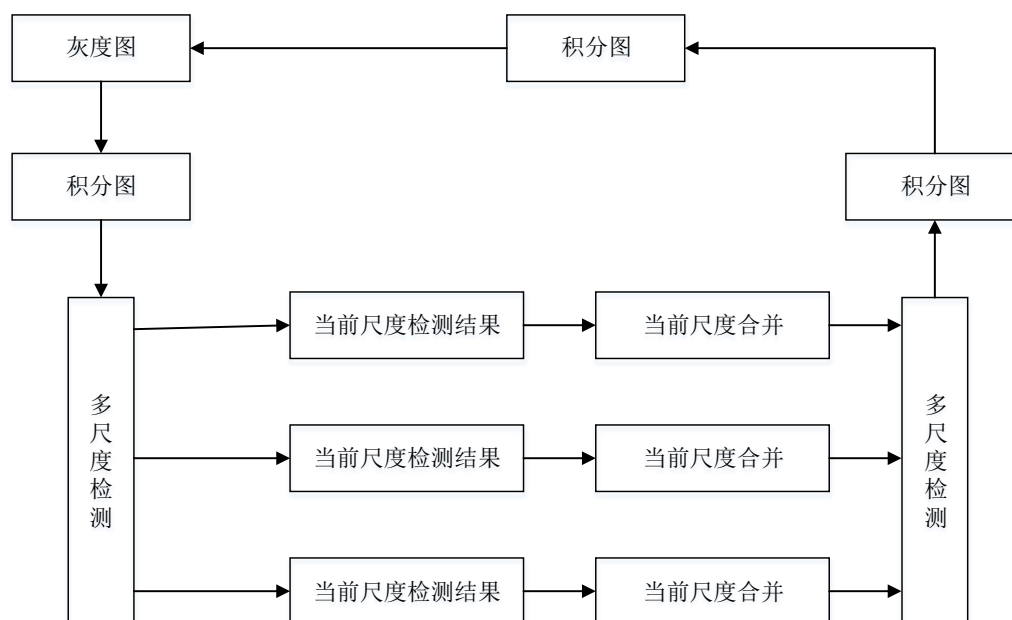


图 4.3 绝缘子识别示意图

第三步是图像多尺度检测。本步骤结合第二步得出的积分图数据进行检测，避免了对原灰度图重复计算。检测过程分别在多尺度情形下进行，检测结果最终被合并。

第四步是汇总不同尺度的结果，并将检测结果输出显示。

## 4.2 图像预处理模块

### 4.2.1 随机概率统计过滤无效图片

在火车上架设的高速摄像机在拍摄过程中可能出现众多无效图片，产生原因包含以下几种：

- 列车向阳行驶过程中由于过度曝光，造成巡检图片亮度太大造成接触网绝缘子细节信息被覆盖。
- 夜间行驶或穿越长隧洞等过程中，由于光线不足造成巡检图片整体偏暗无法提取图片细节。

在以上应用场景中，图像曝光过度或者光线过暗会造成图像丢失细节信息。为了确保无效图片对绝缘子的识别与异常检测造成干扰，需要在巡检图片中判定无效图片并做标记便于系统查询。无效图片的判别方式如下图4.4所示，其中  $I(x,y)$  为灰度图中  $(x,y)$  像素的灰度值， $width$ 、 $height$  分别为原图的宽度和高度。 $FlagBright(x,y)$ 表示灰度图 $(x,y)$ 像素的亮度的标示，值为1时表示该位置灰度值大于215，否则值为0，计算公式如4-4所示。与此类似， $FlagDark(x,y)$ 表示灰度图 $(x,y)$ 像素的暗度的标示，值为1时表示该像素灰度值小于30，否则值为0，计算公式如4-5所示。。

$$FlagBright(x,y) = \begin{cases} 1, & I(x,y) > 215 \\ 0, & I(x,y) \leq 215 \end{cases} \quad (4-4)$$

$$FlagDark(x,y) = \begin{cases} 1, & I(x,y) < 30 \\ 0, & I(x,y) \geq 30 \end{cases} \quad (4-5)$$

图像无效的判别公式如4-6所示。

$$ImgErr = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{(\sum_{i=1}^{width} \sum_{j=1}^{height} FlagBright(x,y))}{width * height} > 80\% \\ 1, & \text{if } \frac{(\sum_{i=1}^{width} \sum_{j=1}^{height} FlagDark(x,y))}{width * height} > 80\% \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4-6)$$

在系统开发过程中，为了确保系统遍历图片的速度，同时为了系统预处理时间控制在可接受的范围内，需要对以上无效图片判别方法进行以下四种优化。

- 首先，图象在内存中的保存占据一段连续的内存空间，但在图像在以二维矩阵方式读取时，由于需要连续多次进行图象中像素地址的重定位，会由于寻

址造成处理时间的浪费，在代码设计过程中考虑将  $I(x,y)$  优化为  $I(x*\text{width}+y)$ ；故而以上  $\text{ImgErr}$  的计算由双重求和变为单次求和。

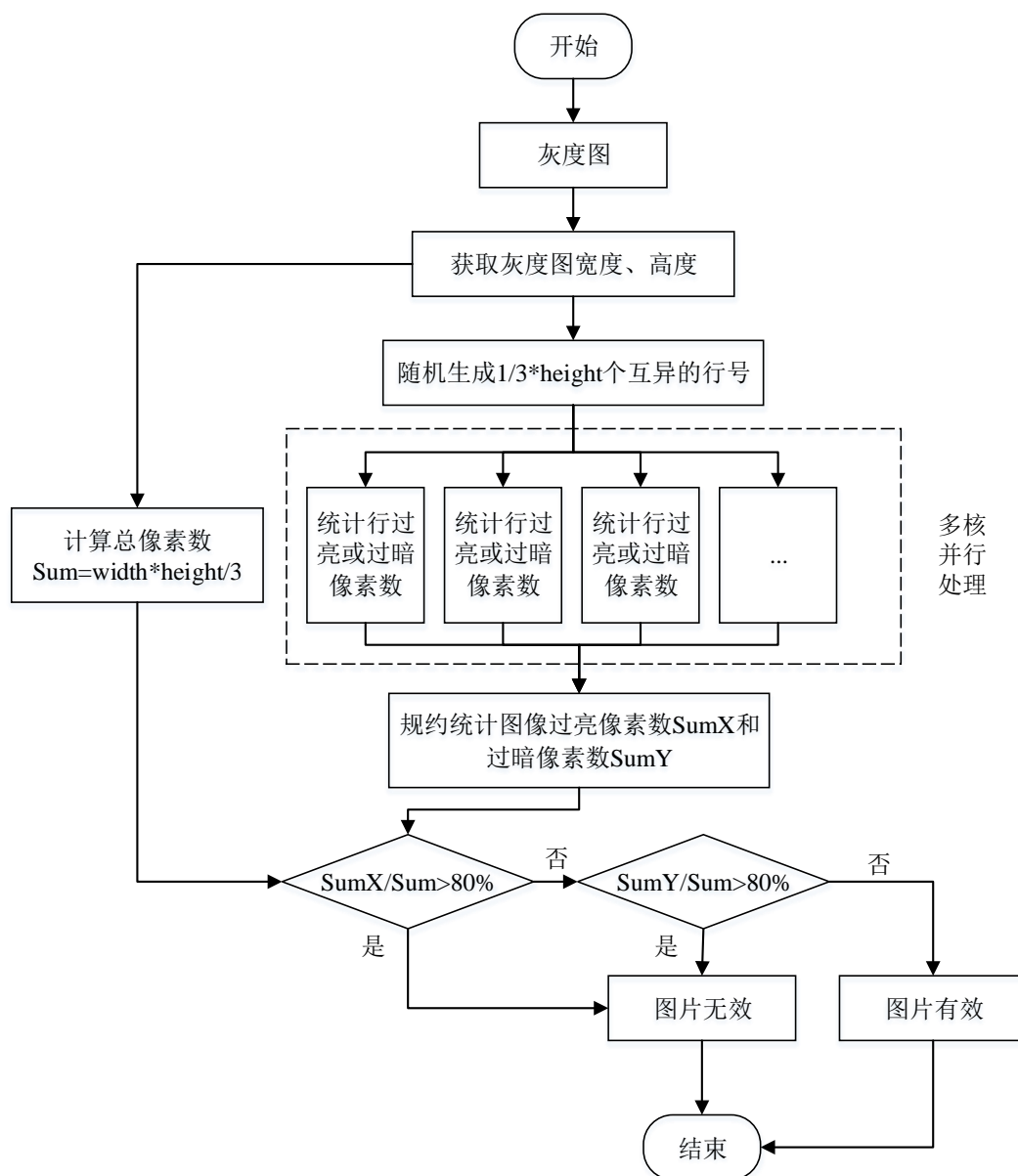


图 4.4 无效图像检测流程图

● 其次，由于本节通过统计像素灰度值规律而判断图像是否有效，考虑到图像整体受光线影响，因此图像的亮暗在整体上有类似的分布规律，即或者整体过亮，或整体过暗，或处于正常水平。因此对于图像的遍历中考虑以随机的方式遍历图像整体  $1/3$  像素的灰度值统计，并不影响统计效果。在以上  $\text{ImgErr}$  公式的计算上体现为  $i$  的取值区间不再是  $[1, \text{width}]$ ，而是  $[1, \text{width}]$  区间内的  $1/3$  个点。

● 在以上第二点的基础上，由于需要在  $[0 \sim \text{width}]$  之间生成  $3/\text{width}$  个互异的点，如果每次随机生成行号的过程中需要重复判断该次生成的随机数是否已经在

之前生成过，那时间复杂度将是  $O(n^2)$ ，空间复杂度为  $O(n)$ 。在一定程度上占用相应的处理时间，为此，可以考虑使用洗牌算法进行时间复杂度上的优化。

● 最后，在统计过程中，像素之间的灰度值统计互不相关。考虑用多核并行的方式对图片进行统计工作。在统计过程中，利用 OpenMP 的编译制导语句可以方便地将程序并行化处理。

本文无效图片过滤处理流程图如图 4.4 所示。首先，系统从大量接触网巡检图片中逐张以单通道灰度图的方式进行读取，并获取该图片的宽度 width、高度 height 等属性；其次，系统在  $1 \sim \text{height}$  之间随机生成  $1/3 * \text{height}$  个互异的行号作为图片待读取行号并保存到数组中；再次，系统判断图片曝光过度或者曝光不足是通过统计像素点灰度值进行汇总统计，在此判断依据上，本系统利用 OpenMP 获取系统可用的 CPU 核心数 N，进而将无效像素点汇总操作拆分成 N 个子任务，每个子任务单独处理统计该行过亮或过暗（判断方式见以上 FlagBright 及 FlagDark 的计算公式）的像素点数目，待所有处理器核心处理完毕后，结果被规约汇总保存在变量 SumX 和 SumY 中。其中 SumX 表示灰度过亮的像素点数目，SumY 为灰度过暗的像素点数目；最终，系统分别计算过亮像素点数目及过暗像素点数目占处理的像素点总数的比例，占比超过 80% 表示该图片为无效图片。系统对该图片名及所在路径保存到本地磁盘文件中用于数据记录。

本文上述处理方式为随机获取待读取行号，在真实进行系统处理时可能会频繁出现读取像素内存区域不连续导致效率受影响。为了进一步优化图片处理速度的，假设仍以取  $1/3 * \text{height}$  作为待读取行数，系统可用核心数为 N，则可以考虑将图片划分为以行为基本单位的 N 个区域，每个区域大小为  $\text{height}/(3 * N)$ 。对于该优化办法而言，每个 CPU 处理核心都将单独处理连续的区域，处理效率取得了提高。

### 4.2.2 部分剔除重复拍摄图片

在巡检图片的采集过程中，由于高速摄像机在单位时间内拍摄多张巡检图片，可能造成同一接触网结构重复拍摄的现象，如图 4.5 所示，系统对同一个接触网支撑结构的多次处理会造成系统运行减慢。经统计发现，对于同一支撑结构，重复图片视列车运行速度不等，一般不少于 16 张/杆。如果在处理过程中重复处理每张图片，会造成处理的重叠而造成时间的浪费。为了保证系统的运行效率，系统设计过程中重复结合高速摄像机拍摄现状，结合 Hough 变换方法识别图像中直线分布，图像中竖直方向直线集中区域被作为接触网支撑结构所在位置，每次迭代访问图片过程中记录该位置并作为是否为重叠拍摄的标准：选取接触网支撑结构距离摄像头位置近并且绝缘子显示完整的位置作为主位置，则重叠拍摄图像

为不在主位置区域的图象。

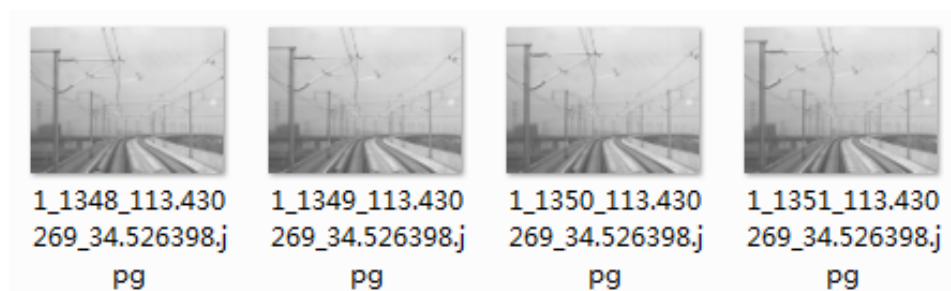


图 4.5 重复拍摄的巡检图片示意图

部分剔除重复拍摄图片算法流程图如图 4.6 所示。

(1) 系统从接触网巡检图片中获取单张灰度图，设置灰度图中宽度  $[0 \sim \text{width}/2]$ ，高度  $[0 \sim \text{height}/2]$  的区域为感兴趣区域 (ROI)，以下处理过程在 ROI 子图中进行处理。同时在  $[0 \sim \text{width}/2]$  的区间内 50 等分，取数组 `Distribu[]` 记录每个区间内含有的竖直直线数目，每个区间数值初始化为 0。因为摄像机拍摄角度及铁轨弯道存在的倾斜问题，所以此处竖直直线是一个相对的概念，通过观察大量巡检图片，取倾斜角在  $[84^\circ \sim 96^\circ]$  之间的直线称为偏竖直直线。

(2) 对 ROI 区域内图像进行 Hough 变换提取直线信息，并保留偏竖直直线数据，直线识别效果图如图 4.7 所示。对每条直线，根据直线在 ROI 区域中识别到的首尾端点坐标连接成线段，取线段中心点横坐标为直线位置，并将相应的 `Distribu[]` 数组的区间数值自增 1 用于计数。在 Hough 变换过程中，需要进行 Canny 边缘检测，本文取 Canny 阈值 1 为 100，阈值 2 为 200，Sobel 算子大小为 3。直线斜率小于  $\tan 6^\circ$  将不被视为接触网支撑结构进而不被处理。

(3) 比较直线分布区间内有最多竖直直线数，取区间数值小（即巡检图片中左侧位置）的线段的中心点横坐标标定接触网支撑结构位置  $w$ ，当该位置处于原图 ROI 位置宽度  $\text{width}/6$  处左侧时，认定该位置为不重叠区域，其他区域为重叠区域。

(4) 另，结合本文 4.1 机器学习模块中对绝缘子结构的识别，由于摄像机拍摄角度问题，可能出现绝缘子出现于照片视野外的情形。此时应考虑读取该位置附近的图象（C2 中连续拍摄的图象名称有一定的连续性）。本系统在函数设计上预留出相关接口保证运行。



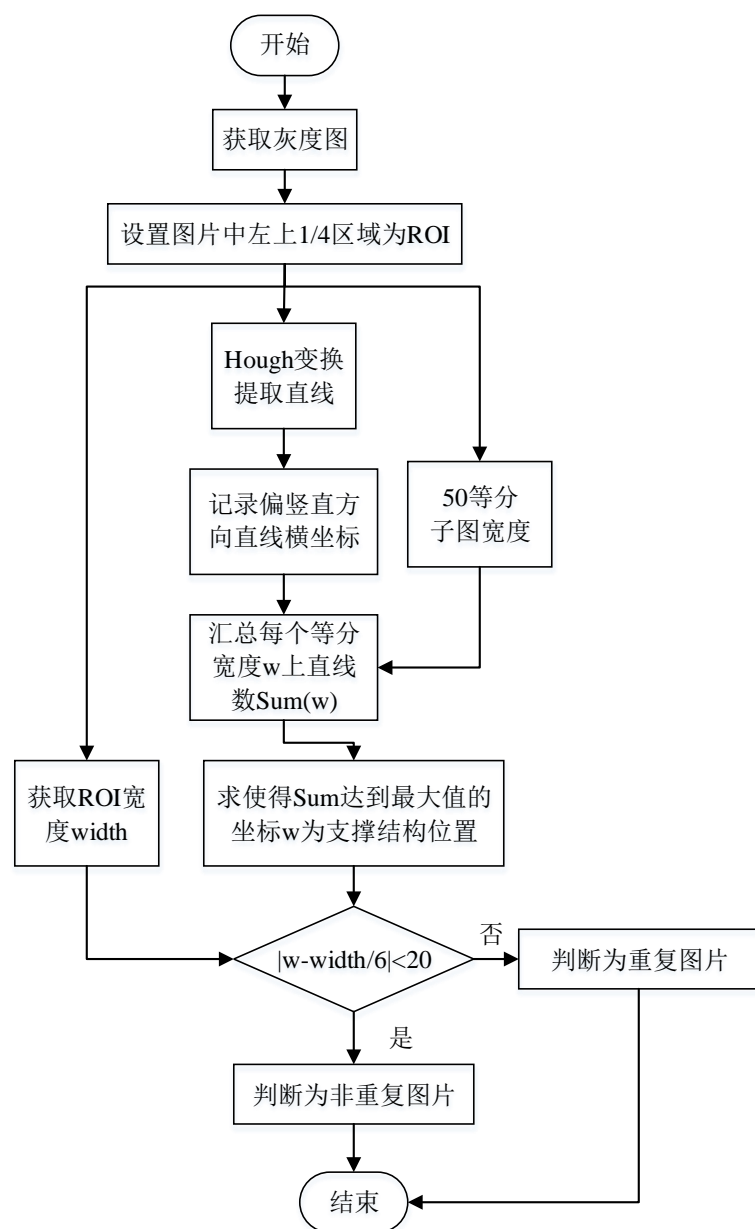


图 4.6 部分剔除重复拍摄图片算法流程图

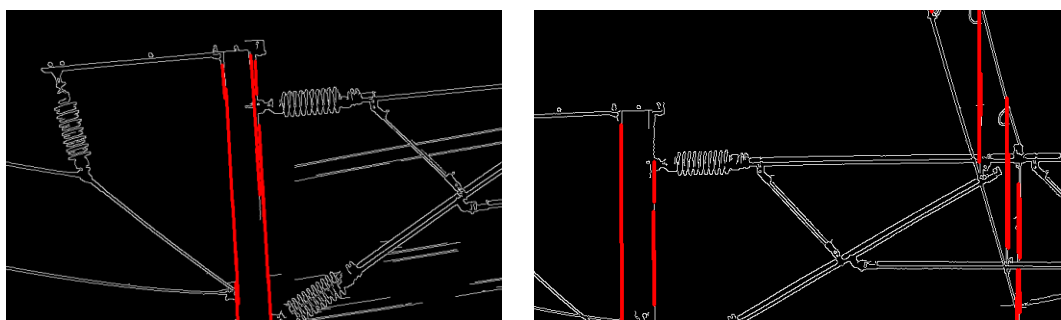


图 4.7 巡检图片直线提取效果图

### 4.2.3 图像增强

在绝缘子识别与异常检测的过程中，由于巡检图片拍摄于室外，环境复杂多变，巡检图片的拍摄质量收到了不同程度的影响，进而对绝缘子检测及异常识别的准确度造成了干扰。例如由于阴雨天气造成巡检图片中存在大量噪点，绝缘子区域形状轮廓也模糊不清难以辨别；车辆傍晚行驶过程中由光线不足导致绝缘子边缘不清晰，无法提取准确有效的边缘数据造成异常检测不够准确。加之在图像由于列车高速运行中进行采集存在一定的失真现象，对后续机器学习阶段及异常识别阶段产生了持续性的影响。

本文主要采用以下两种方式增强图像信息。

- 对比度增强
- 中值滤波

为了突出巡检图片中接触网支撑结构及绝缘子等目标的灰度区间，同时在一定程度上抑制背景区域的干扰，本文采用分段方式对图片进行线性变换。对于灰度图而言，灰度值取值范围为 $[0\sim 255]$ ，本文将该范围划分为三段，分别为 $[0\sim 80)$ ， $[80\sim 160)$ ， $[160\sim 255]$ 。该变换方法如图 4.8 所示。其中  $f(x,y)$  为原图， $g(x,y)$  为增强对比度后的灰度图。由图可知，感兴趣灰度值区间为 $[80\sim 160]$ ，经过对比度增强后该区间被扩大为 $[72\sim 168]$ ，图像信息得到加强，同时图像中较亮区域 $[168\sim 255]$ 及图像中较暗区域 $[0\sim 80]$ 被相对压缩，这两部分区域的图像信息减损。

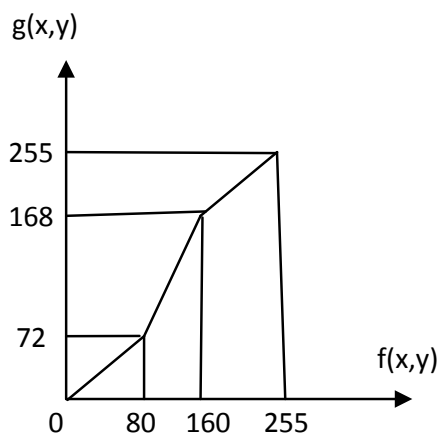


图 4.8 三段线性变换图增强对比度

本文对比度变换过程可以使用以下公式 4-7 计算得出，遍历感兴趣区域图像后即可得到效果图。

$$g(x,y) = \begin{cases} \frac{72}{80} * f(x,y) & 0 \leq f(x,y) < 80 \\ 72 + 1.2 * (160 - f(x,y)) & 80 \leq f(x,y) < 160 \\ 168 + \frac{87}{95} * (255 - f(x,y)) & 160 \leq f(x,y) \leq 255 \end{cases} \quad (4-7)$$

本文在图像预处理时进行图像增强的过程中除了增强对比度之外，也对绝缘子边缘信息进行相应的锐化处理。由于绝缘子的异常识别主要通过巡检图片的边缘信息进行提取，因此通过锐化使得绝缘子的模糊边缘更加清晰显得尤其重要。图像模糊滤波的本质为通过特定的函数对图像进行卷积运算，与之相反，为了获得更清晰的图片，可以通过微分运算获取图像细节信息。

本文采用了简易的锐化办法，即通过 2.3.1 节所描述的高斯滤波办法对待锐化图像进行滤波模糊化，将原图与滤波后的效果图相减获得 Mask 图，进一步地将原图与 Mask 图叠加即可获得锐化后的图像。

### 4.3 异常识别模块

在铁路列车行驶过程中，由于绝缘子自爆等原因，绝缘子串常常在出现一定长度的缺口。缺口的长度在不同环境下各不相同，一般为单片绝缘子长度的 2-3 倍，在图像中较为明显。在绝缘子异常检测模块，系统实现使用多个结构相异的绝缘子图片作为模板，在系统进行异常检测过程中，系统采用 Gabor 特征匹配的方法对巡检图片中绝缘子的偏斜角度进行确定。在绝缘子缺陷确定过程中，在灰度统计的基础上确定绝缘子异常的存在。

#### 4.3.1 基于主方向的巡检图片偏斜度确定方法

在铁路列车行驶过程中，为了避免高速行驶的列车在弯道存在的安全隐患，铺设铁轨时需要与水平线保持一定的倾斜度，而绝缘子所在的接触网支撑结构往往由于重力原因以竖直方向架设。在高速摄像机拍摄接触网巡检图片的过程中，拍摄位置处于与铁轨平行的平面，因而拍摄出的绝缘子角度在巡检图片中也不处于水平位置。除此之外，部分绝缘子在接触网中本身就处于非水平位置，因为即使列车在水平方向行驶，巡检图片中绝缘子位置仍然有一定的偏斜角度。在对绝缘子进行异常检测的过程中，需要实现确定绝缘子偏斜角度。

本文约定“主方向”为灰度图像中边缘在某个方向上最为集中的方向，该概念能够描述图像中物体的倾斜位置，在目标物体形状一致的情况下具有很好的处理效果。在此基础上，本文设计了一种基于 Gabor 滤波器的主方向识别方法用于处

理绝缘子方向。系统的处理过程如图 4.9 所示。系统细分 8 方向初始化 Gabor 核函数，进而对输入图像作 Gabor 特征向量提取。本文设计的提取方式过程为：

- (1) 将输入图像与 8 个方向的 Gabor 核函数卷积，生成 8 个滤波响应函数；
- (2) 计算每个 Gabor 滤波响应函数的能量值；
- (3) 将每个输入图像产生的 8 个能量值作为该灰度图的特征向量；
- (4) 对于步骤 3 生成的特征向量归一化；

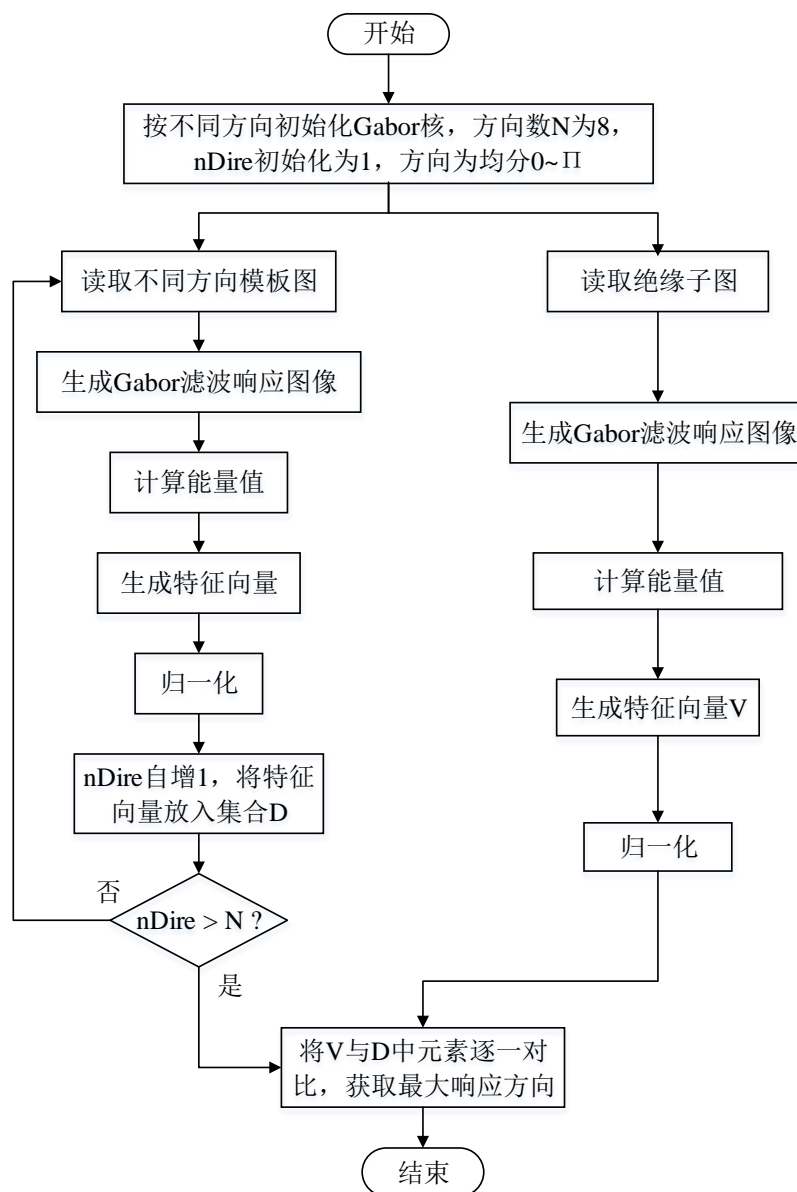


图 4.9 求取主方向流程图

#### (1) Gabor 初始化

本文采用基于 Gabor 核函数提取图像特征，在进行特征向量提取之前应该根据方向性初始化 Gabor 核，以用于生成滤波响应图像。Gabor 核初始化过程如下

设计，其中变量含义约定如下：

- $\varphi$  方向相位，本文根据项目需要分别取值为  $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8$  等 8 个方向。
- $N$  尺度，取值范围为  $(0, +\infty)$ ，本文取 1。
- $\sigma$  本文设置为  $2\pi$ 。
- $F$  空间频率，设置为  $\sqrt{2}$ 。
- $d$  Gabor 核直径大小。

Gabor 核直径  $d$  的计算方式如以下公式 4-8, 4-9 所示。

$$\sigma' = \frac{2\sigma}{\pi} * F^N \quad (4-8)$$

$$d = [\sigma' * 6 + 1] \quad (4-9)$$

而 Gabor 核分为实部和虚部，计算公式分别如 4-16, 4-17 所示。中间演算过程如公式 4-10~4-15 所示。

$$m = i - (d - 1)/2 \quad (4-10)$$

$$n = j - (d - 1)/2 \quad (4-11)$$

$$K = \frac{\pi}{2F^N} \quad (4-12)$$

$$X = \frac{K^2}{\sigma^2} * e^{-\frac{(m^2+n^2)*K^2}{2\sigma^2}} \quad (4-13)$$

$$Y = \cos(K * \cos(\varphi) * m + K * \sin(\varphi) * n) \quad (4-14)$$

$$Z = \sin(K * \cos(\varphi) * m + K * \sin(\varphi) * n) \quad (4-15)$$

$$Gabor_{re}(i, j) = X * Y \quad (4-16)$$

$$Gabor_{im}(i, j) = X * Z \quad (4-17)$$

## (2) 计算 Gabor 特征向量

Gabor 核函数有实部和虚部，分别有不同的用处。实部与图像卷积后图像会得到平滑处理，虚部与图像卷积可以从来检测边缘。在本文进行主方向提取过程中主要为了获得幅度，因为卷积结果图像每个像素的值为实部与虚部卷积原图像获得值的平方和。

获得滤波响应图像后，本文进一步计算每幅图像的能量值。现约定图像能量值为灰度图中每个像素点灰度值的平方和。由于本文初始化 8 方向 Gabor 核函数，因而生成的 8 个滤波响应图像共有 8 个能量值。每个能量值作为单独的特征值组成原图的特征向量，用于表示原图在 8 个方向的灰度强度。由于巡检图片拍摄于

不同的环境下，由于光照强暗等原因造成此时滤波响应大小不一样，为了更好的衡量原图在不同方向上的响应影响，需要对特征向量进行归一化。归一化过程即为将特征向量中每个元素重新赋值为原值与元素值之和的比。

### (3) 计算最大响应方向

本文通过比较方向相似度来获取绝缘子在巡检图像中的方向。在通过特征向量进行主方向对比时，应该根据特征向量获取主方向向量。主方向向量用于标识原 8 方向，例如对于 $[0.2, 0.3, 0.1, 0.4]$ 中，主方向为 $[3, 1, 0, 2]$ 。

为了更准确地计算两个向量的匹配度，需要将上述主方向向量与相应方向权值向量相乘作为结果。主方向权值的计算思路为：主方向有更高的权值，次方向相应降低。具体计算方法为每个方向权重的分子为 1,2,4,7,11,16,22,29,...的逆序，分母为  $1+2+4+7+11+16+22+29+\dots$ 。以本文 8 方向 1 尺度的 Gabor 核函数为例，生成的特征向量有 8 维。则主方向权重分别为  $29/90, 22/90, 16/90, 11/90, 7/90, 4/90, 2/90, 1/90$  等。

将输入的灰度图与不同的绝缘子模板图的多个尺度 Gabor 滤波响应图进行相似度对比，取最高匹配度的模板图并记录此时的方向。

## 4.3.2 基于灰度统计的异常识别方法

在经过机器学习模块识别绝缘子位置，并经过预处理及主方向校正后，系统得到如图 4.10 所示的绝缘子部位图像及其边缘提取图像，边缘图获取前已经经过高斯滤波去除噪声点。其中(a)为绝缘子正常状态下的灰度图，(b)为绝缘子正常情况下经过图像预处理、角度校正及边缘检测产生的边缘图，(c)为存在绝缘子片缺失时的灰度图，(d)为图(c)对应的边缘图。

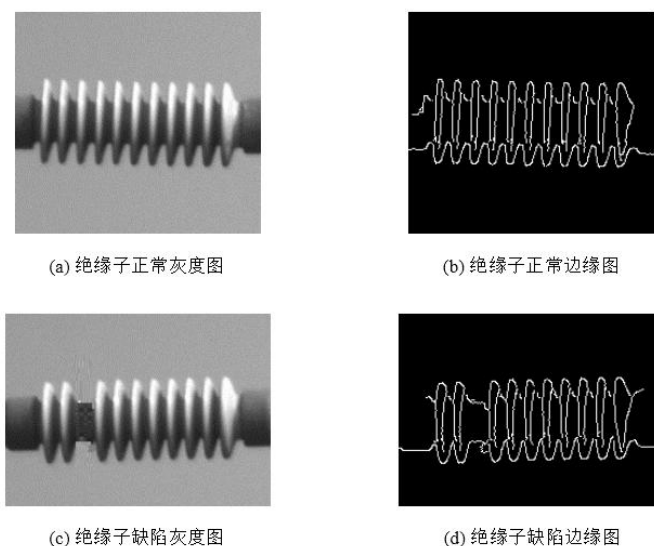


图 4.10 绝缘子异常图

对比上图 4.10(b)和 4.10(d)可知,对于存在缺陷的绝缘子其边缘存在缺失,在竖直维度上可以采用灰度统计的方法计算绝缘子图像波峰信息,如果跨距较大,可以判断该部分绝缘子存在疑似异常。灰度统计效果图如图 4.11 所示。由图可知,含有缺陷的绝缘子的灰度统计图在绝缘子片缺失的部分存在两倍于正常绝缘子的空白,是异常识别的关键。本文约定灰度统计图为原图对应的边缘图在  $x$  轴方向的边缘点数目,如边缘图中  $col$  列上有  $nCol$  个边缘像素点,则对应的灰度统计图中  $col$  列从  $0 \sim nCol-1$  行都置为白色,其余像素点置为黑色。

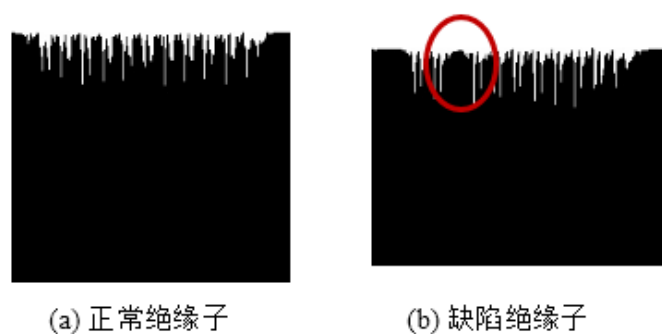


图 4.11 绝缘子灰度统计图

绝缘子灰度图中由于光照等原因形成的阴影,导致生成的边缘图惨杂阴影,进一步造成图 4.11 所示的灰度统计图中在对应绝缘子片的部分中出现多个波峰。具体识别步骤如下:

- (1) 获取灰度统计中波峰高度,记为  $H$ ,并在图中划定一条平行于  $x$  轴的直线  $L$ ,该直线高度为  $H/2$ ;
- (2) 在直线  $L$  上获取白色像素点间隔,分别记为  $d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_n$ ;
- (3) 将  $d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_n$  进行排序,排序结果记为  $d_1', d_2', d_3', d_4', \dots, d_n'$ ;
- (4) 给定间隔阈值  $thre$  作为划分两个间隔是否近似相等的依据,两个间隔的差的绝对值小于  $thre$  时认为二者等距。本文  $thre$  取值为 5;
- (5) 使用 Map 的  $\langle key, value \rangle$  值用于记录间隔数目,  $key$  表示间隔值,  $value$  记录直线  $L$  中该间隔的数目。迭代遍历  $d_1', d_2', d_3', d_4', \dots, d_n'$ , 如果  $|d_m' - d_{m-1}'| < thre$ , 则取 Map 结构中  $key$  值与  $d_m'$  值的差的绝对值小于  $thre$  的  $key$ , 将其  $value$  值自增 1。如果 Map 结构中不存在该  $key$  值,则插入  $d_m'$  作为  $key$  值,取 1 作为其  $value$  值;
- (6) 获取 Map 中最大  $key$  值,当  $key$  值大于 Map 中其他  $key$  值的 1.8 倍,且  $value$  值不大于 2,则判断该张灰度统计图对应的巡检图像存在疑似异常。

## 4.4 人工精检模块

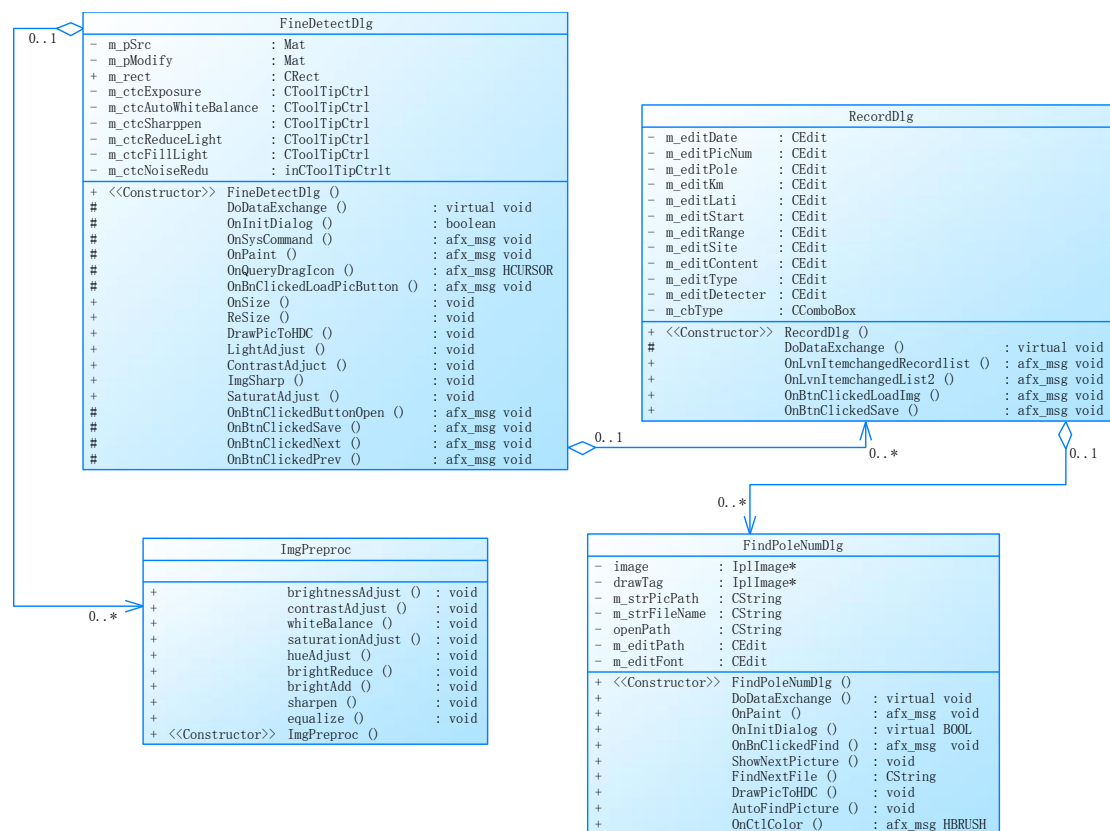


图 4.12 人工精检模块类图

在进行计算机智能粗检的过程中，为了防止绝缘子故障漏检，在检测过程中的全部疑似图片都将被标记进入精检系统。简而言之，智能粗检系统以全部接触网巡检图片为输入，为部分存在疑似异常的巡检图片为输出。智能粗检系统输出的疑似缺陷图片被保存在工作人员指定的文件夹中，人工精检模块主要以该文件夹为检测目标。除此之外，工作人员可以指定任意文件夹中的图片作为精检的目标文件进行人工检测。

人工精检模块主要在工作人员专业技术与经验为判断依据，以单张图片为异常检测的目标，通过观察图像中绝缘子结构判断绝缘子故障情况。在此基础上，工作人员根据图片中杆号等相关信息判断故障所在区域坐标，并利用系统进行缺陷记录。

该模块主要为工作人员识别异常提供便利，包含四个主要内容：

- 图像打开操作集，包含打开图片、上一张、下一张、删除、重新加载等操作
- 图像自动调节操作集，包含自动曝光、白平衡、一键锐化、减光、补光



和降噪等

- 手动调节操作集，包含亮度调节、对比度调节、图像尺寸调节等
- 缺陷日志记录，通过图像中相关信息及工作人员的专业经验记录绝缘子缺陷日志。对于杆号显示不清晰的图片通过查看该图片前后图像查找。

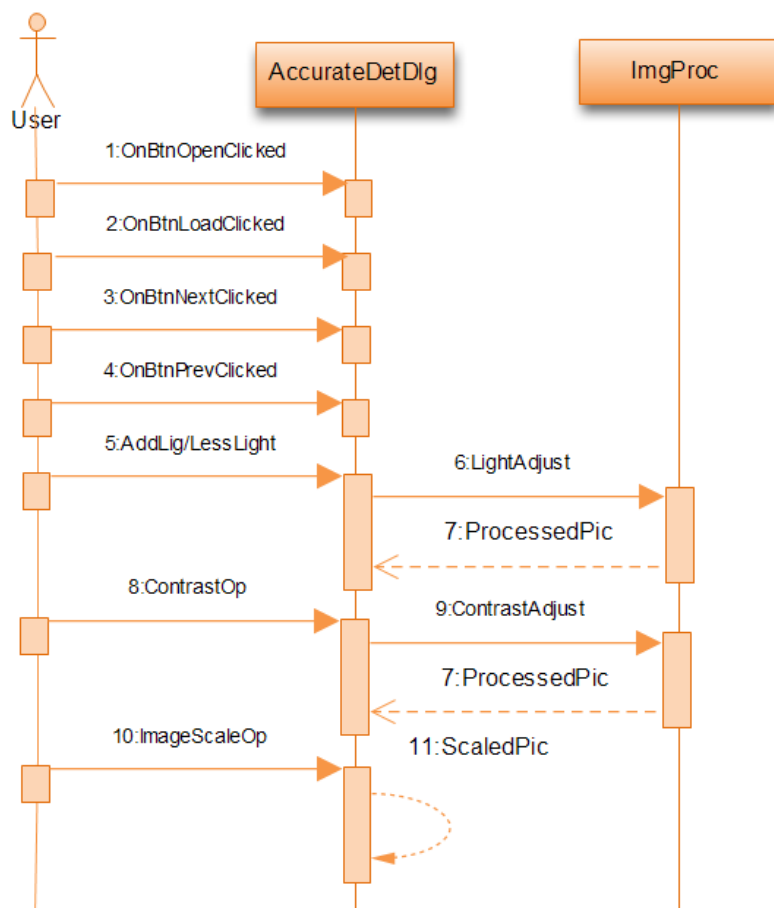


图 4.13 图像加载与调节时序图

人工精检模块类图如图 4.12 所示。其中忽略了类设计中部分界面相关的属性和方法。图像加载与调节时序图如图 4.13 所示。用户在精检页面分别点击“打开”按钮、“重新加载”按钮、“上一张”按钮或“下一张”按钮打开相应的图片进行处理。点击补光、减光或对比度调节按钮，程序调用图像处理类 `I'mProcedure` 进行图像操作。除此之外，`AccurateDetDlg` 类对象调用自身方法调节图像显示尺寸供用户编辑。

对于疑似缺陷图片日志记录功能，时序图设计如下图 4.14 所示。`AccurateDetDlg` 为精检对话框类，`RecordSearchDlg` 为缺陷查询对话框类，`RecordWriteDlg` 为缺陷记录对话框类。

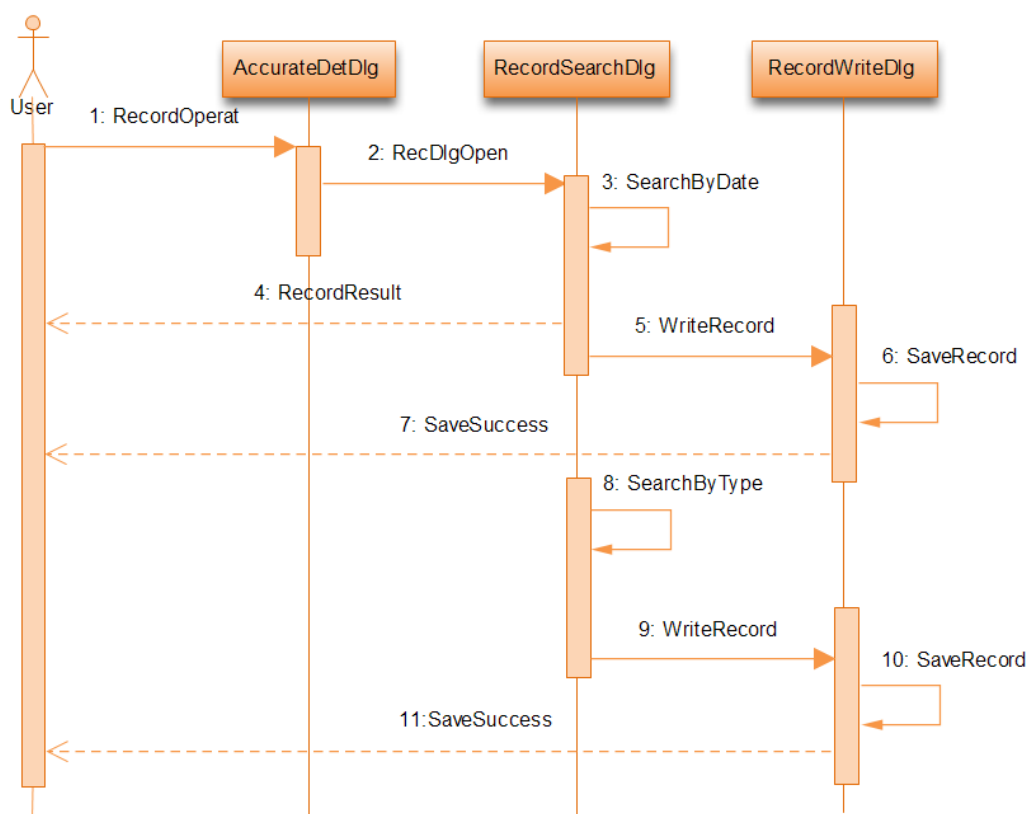


图 4.14 缺陷图片日志记录时序图

## 4.5 多核并行检测

自从 1996 年多核处理器架构被提出开始，麻省理工学院、斯坦福大学等高等院校相继投入研发精力参与多核操作系统的设计与研发。与此同时，随着研究成果的不断涌现，多核计算机也随之吸引了 IBM、SUN 等计算机领域行业巨头的注意，众公司也以资本投资或直接投入研发人员的方式加入多核计算机的研发<sup>[33]</sup>。时至今日，多核计算机已经普及至家用和商用计算机中，也由此，本系统建立在这个基本认识下合理利用计算机多核资源加快巡检图片的处理。

由于本系统涉及到批量图片处理、多运算步骤同步等问题，所以采用多核并行技术结合多线程同步的方式保证系统的高效性。本文采取多核多线程的设计模型，最大程度地使用计算机的 CPU 资源并服务于图像计算中。本软件系统设计应保证硬件系统中的 CPU 资源被均衡负载，避免出现 CPU 资源被闲置的状态导致多核计算机的优势无法得到体现。

本系统多核并行技术主要应用于 20G 以上图片读取、图像预处理、图像特征

提取、异常识别等模块。利用多线程同步处理各个图像操作步骤，并对相对独立的迭代操作进行多核并行加速。

在接触网绝缘子异常检测系统中巡检图片较多，因而设计过程中以 CPU 核心数为单位将系统划分为多核模块进行处理，如图 4.15 所示。

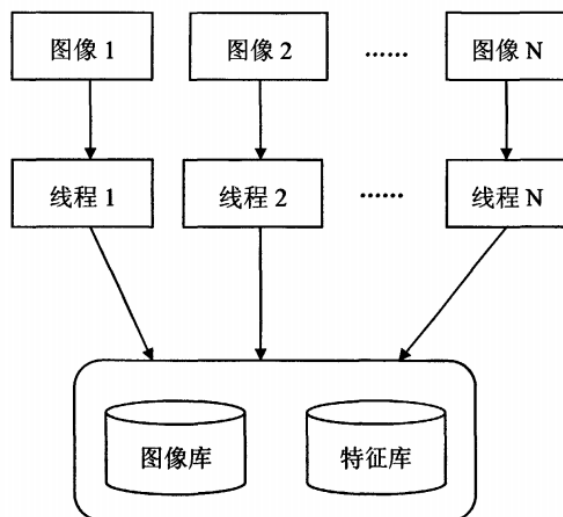


图 4.15 批量图像并行处理图

假设接触网巡检图像数量有  $N$  张，计算机系统有  $M$  个可用的 CPU 核心，则系统将派生出  $M-1$  个子线程，共计  $M$  个线程参与图像批处理。为了均衡多个 CPU 核心之间的运算，系统将  $N$  幅图像划分成  $M$  个子任务进行处理，前  $M-1$  个子任务分别处理  $\lceil N/M \rceil$  个文件，最后一个子任务处理剩余的  $N - \lceil N/M \rceil$  个文件。在此基础上，系统各 CPU 核心之间处理的图片数据趋于平衡，因而 CPU 资源得到了充分的利用，提高了系统计算效率。

该方法将巡检图片文件夹中的所有文件分成多个子任务单独处理，每个子任务单独处理一定数目的巡检图片，按照顺序依次像处理器输入需要处理的图象，此处满足了时间重复概念所描述的情况，即多个子任务的处理过程操作按照流水线的方式进行。当一副图像进行图像处理时，由于系统输入输出设备空闲，另一幅图像就可以使用系统输入输出设备。同时，对于每个子任务创建单个线程进行执行，每个子任务依次按照输入巡检图片—部分剔除重复图片—过滤无效图片—图像增强—基于机器学习离线训练结果识别绝缘子位置—绝缘子弧度分段校正—异常识别的顺序执行，因而对于每个子任务而言是采用流水线并行的方式进行的。

在图像预处理过程对巡检图片进行过滤和特征加强是保证系统执行效率的重要保证，此时存在多处图像迭代遍历访问的耗时操作，同时由于多个处理步骤

之间操作相对独立（如图 4.4），可以考虑使用多核并行的方式进行处理。

## 4.6 本章小结

本章结合需求分析和总体设计的内容对绝缘子异常检测系统展开详细设计。详细设计的内容包含五个基本模块，分别是机器学习模块、图像预处理模块、异常识别模块、人工精检模块、多核并行检测模块等。并利用流程图、类图、时序图等方式对系统进行详细设计，并结合图像处理中间效果图和计算公式阐述中间处理细节。本章在算法设计上提出了绝缘子无效图片过滤算法、重复拍摄图片快速处理算法、基于主方向的偏斜角度判断算法、基于灰度统计的异常识别方法。在软件设计上，本文在人工精检模块采用了多种 UML 图开展设计。

## 第五章 实验与分析

### 5.1 实验介绍

本文在结合多核并行技术的基础上，对接触网绝缘子异常检测系统展开需求分析和系统建设工作。本章实验与分析主要包含以下内容：

- 从大量分辨率不同、环境差异大的接触网巡检图片中进行绝缘子检测与识别工作，判断算法识别绝缘子的能力；
- 在巡检图片中混入部分曝光过度、光线过暗的图象，验证系统过滤无效图片的能力。与此同时，对比多核并行技术与单核处理的时间效率，对比非随机处理行像素和处理所有行像素的效果异同以及时间效率等；
- 在巡检图片中过滤重复拍摄同一接触网支撑机构图片的能力，判断系统过滤的重复拍摄巡检图片比例，并验证准确率；
- 在巡检图片中加入部分绝缘子故障图片，得出系统识别绝缘子异常的准确率；
- 结合需求分析说明，判断人工精检模块操作的准确性，测试图像处理、日志记录等用户操作的便捷有效性；

### 5.2 实验环境

系统采用 C++ 语言进行开发，以 OpenMP 辅助完成多核并行的开发。系统界面使用 MFC 进行搭建。

硬件配置：

CPU：英特尔第三代酷睿 i7-377 3.4GHz、四核/八线程

内存：4GB（宇瞻 DDR3 1600MHz）

显卡：AMD Radeon HD 7450（1GB/微星）

软件配置：

操作系统：Windows 7 旗舰版 64 位 SP1（DirectX 11）

开发语言：C++

系统运行环境：Visual Studio 2013

数据库：MySQL

## 5.3 实验结果与结论

### 5.3.1 多核并行处理

本系统在多方面对系统的时间性能进行优化和提升，尤其是利用 OpenMP 多核并行处理技术框架对系统识别与处理速度有了极大的提升。系统的多核并行处理主要应用在以下两方面：

- 图像预处理识别过度曝光、光线过暗等无效图片
- 大量图片中的绝缘子识别

以下试验在单核、双核、四核

等核心数计算机情况下，分别处理图像并对处理时间进行统计分析。其中图像预处理模块的多核并行处理以单张图片处理速度为基础，分别比较拥有不同处理器核心的系统处理不同分辨率的时间性能；其次，对于绝缘子异常识别模块，分别比较不同图象数量级下处理器核心数不同的系统的处理时间性能。

以下表 5.1 所示为不同处理器核心的计算机下，系统对不同分辨率图片进行预处理的时间数据（不计入图像读取时间）。

表 5.1 图象预处理的多核并行处理

图片分辨率	平均处理时间/s		
	单核	四核	八核
1620*1236	0.0205	0.0059	0.0032
2448*2056	0.0355	0.0101	0.0071

以下表 5.2 所示为为不同处理器核心的计算机下，系统对不同数量的图片进行绝缘子识别的时间。

表 5.2 绝缘子识别的多核并行处理

图片数量	平均处理时间/s		
	单核	四核	八核
50	33.24	9.17	4.88
500	295.69	82.14	42.85
5000	3014.52	837.37	436.82

### 5.3.2 绝缘子识别

本小节通过实验分析绝缘子识别的效率。由于列车运行于环境差异大的环境

之中，因此基于图像预处理及机器学习技术下的绝缘子识别效果也相应产生影响。在本实验中，对接触网巡检图像分类成多个场景，在此基础上检测绝缘子的识别准确率和时间效率。以正常无复杂背景环境、雾霾、树木背景、直铁轨、弯曲铁轨等环境下绝缘子的检测为检测数据，得出以下统计数据。该数据表针对所有场景检测 100 张不相似图像作为结果数据。

表 5.3 绝缘子识别时间与准确率

场景	时间（秒）	准确率
正常简单环境	0.092	96%
雾霾等恶劣天气	0.091	96%
有树木背景	0.092	94%
拍摄角度不正	0.092	97%

通过以上试验结果数据可以看出，通过 Adaboost 算法对绝缘子进行识别有着较高的识别准确率和较快的识别时间。尤其是高速摄像机随着列车在不同环境场景下移动拍摄时，系统能较好地处理环境差异对识别带来的干扰，普遍具有高准确率，能有效为系统后续异常检测提供基础数据。因此表明 Adaboost 算法能兼顾识别准确率与实践效率。实验采用的部分图像数据如图 5.1 所示。

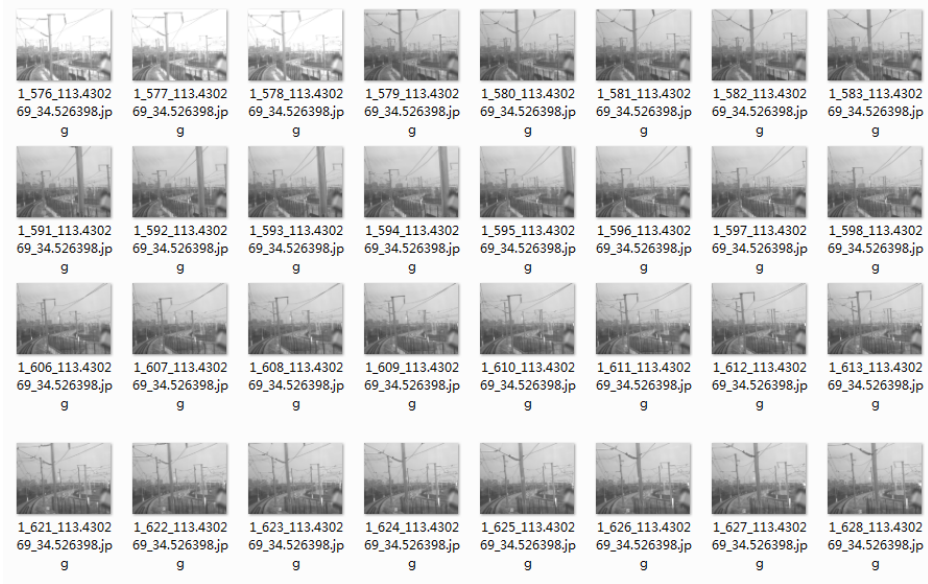


图 5.1 图像识别部分数据源

5.3.3 绝缘子异常检测

绝缘子异常检测是本系统设计的重要环节之一，也是系统的应用目标。本小

节从异常识别的时间速率、异常识别的准确度、疑似异常的判断比例等多个维度对绝缘子异常识别模块的设计及实现效果进行检测，系统检测统计数据集如下表 5.4 所示。该检测内容以上海铁路局合肥供电段提供的多次巡检图片为测试数据，每次测试完整一条线路的数据集。

表 5.4 异常检测结果统计表

列车线路	图片数（张）	检测时间（秒）	疑似异常图片比例
合肥站 - 蚌埠站	19232	3360	23.56%
蚌埠站 - 合肥站	22037	3556	17.22%
合肥站 - 上海站	21147	3519	19.52%
上海站 - 合肥站	21698	3563	16.21%

由上表 5.4 可看出，系统对于 20G 以上的图片能在 3 小时内完成图像的粗检，并保证为工作人员过滤 80% 以上的正常图片，系统检测效果满足系统建设目标，为工作人员工作效率提升了 500% 以上。

在系统运行操作上，系统提供了友好的人机交互方式，为工作人员干预智能粗检系统的运行进程提供了途径。用户可以根据需要对系统选择“开始”、“暂停”、“继续”和“终止”等方式，系统功能界面如图 5.2 所示。本节对该操作提供了测试计划并给出实际测试结果，测试数据如表 5.5 所示。

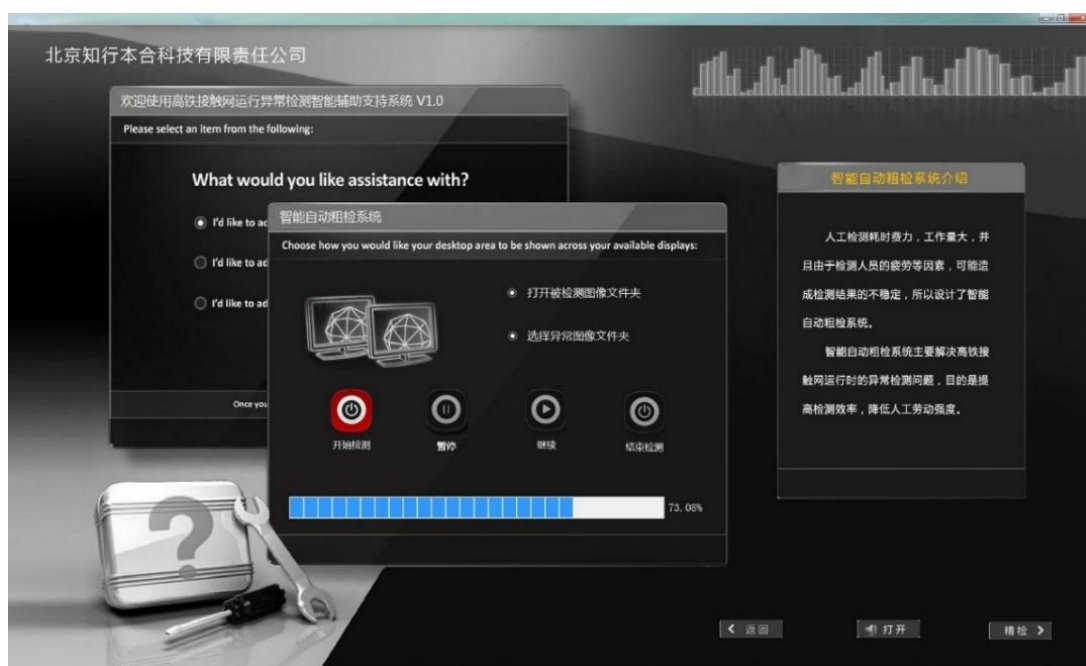


图 5.2 智能粗检模块运行界面图



表 5.5 粗检系统测试表

编号	测试内容	预计结果	实际结果
1	鼠标点击“开始检测”	粗检进程开始，进度条滚动，并将含有疑似异常的图片筛出。结果保存路径与原图片路径有相同的相对路径	符合
2	鼠标点击“开始检测-暂停检测”	点击“开始检测”后粗检开始，点击“暂停检测”后粗检暂停，不再输出疑似绝缘子异常的图片	符合
3	鼠标点击“开始检测-暂停检测-继续检测”	粗检过程依次经历检测开始，检测暂停、恢复检测等过程。图片操作及进度条显示正常	符合
4	鼠标点击“开始检测-继续检测”	系统在点击开始检测后开启粗检操作，继续点击“继续检测”系统不被中断	符合
5	鼠标点击“开始检测 - 结束检测”	系统在点击开始检测后开启粗检操作，继续点击“继续检测”系统终止检测	符合
6	鼠标点击“继续检测”或“暂停检测”或“终止检测”	系统正常运行	符合

5.3.4 人工精检系统



图 5.3 人工精检模块界面图

人工精检系统主要为工作人员分析接触网巡检图片提供便利操作，该模块界面如图 5.3 所示。本小节主要测试打开图像后系统能否根据用户操作响应对应的处理，得到符合要求的图片。该模块测试计划及测试结果如表 5.6 所示。

表 5.6 人工精检模块测试结果表

编号	测试内容	预计结果	实际结果
1	鼠标点击“打开”或在已打开图片时点击“上一张”、“下一张”	成功打开并加载图片	符合
2	鼠标点击“自动曝光”按钮	图像整体曝光成功	符合
3	鼠标点击“白平衡”按钮	图像白平衡处理成功	符合
4	鼠标点击“锐化”按钮	图像锐化成功	符合
5	鼠标点击“一键减光”按钮	图像亮处灰度值降低	符合
6	鼠标点击“一键补光”按钮	图像暗处灰度值增加	符合
7	鼠标点击“高 ISO 降噪”按钮	图像噪点减低	符合
8	鼠标拉动“亮度”滑块	图像亮度随滑块增加或缩小	符合
9	鼠标拉动“对比度”滑块	图像对比度随滑块增加或缩小	符合
10	鼠标先在图像中选定区域，再拉动“尺寸”滑块	图像尺寸随滑块增加或缩小	符合
11	鼠标点击“还原”按钮	图像还原至未处理状态	符合

## 5.4 本章小结

本章设计分别对绝缘子异常检测时间效率和处理效率进行分析统计，并对系统运行建立测试计划并给出测试结果。在系统内部算法上，本章比较分析了多核和单核处理器在图像预处理模块和绝缘子识别模块的作用；其次，本章对绝缘子的识别与异常检测设计实验分析其准确率与实践效率；最后，本章对人工精检系统的运行设计测试计划并给出测试结果。实验结果显示，本系统功能设计合理，算法效率高，符合系统建设需求。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

图像识别与处理技术发展到今天已经有很多年的历史了，而且在需要领域得到了广泛的应用。计算机的智能图像识别与异常检测有其天然的优势，极大地提高了识别和检测效率，满足了用户对时间效率上的要求，也解放了一部分人力资源。本文结合当前流行的多核并行技术，在采用多核 CPU 的计算机上，实现了高铁绝缘子多核并行异常检测系统的研发，提高了绝缘子检测效率。

本文主要做了以下工作：

(1) 本文系统地介绍了绝缘子异常检测现存的问题和人工检测的劣势，并对国内外的绝缘子检测系统进行了总结和概述，提出了各系统的特点和不足。

(2) 提取高铁接触网巡检图片的 HAAR 特征，根据 Adaboost 算法对样本图片做训练。在采集正负样本数据，生成样本描述文件后，调节机器学习参数生成绝缘子级联分类器。

(3) 将多核并行技术深入应用于异常检测系统中，尤其是图像处理操作上极大地提高了系统运行效率。使得巡检图片的批量预处理，机器学习的样本采集等操作运行效率成本提高。

(4) 对绝缘子的异常检测提出了解决方案，解决了不同拍摄角度、不同光照环境下的巡检图片过滤及绝缘子识别与处理问题，有效地解决了缺陷异常的识别和记录，同时保证绝缘子异常检测的准确率满足系统建设要求。

(5) 完成人工精检子系统的开发设计和实现方案，在智能粗检子系统找出疑似异常之后，该子系统能对存在疑似异常的图片进行编辑亮度、清晰度和放大等操作，并完成缺陷记录。

### 6.2 展望

在接触网异常检测业务中还存在着许多富有可以结合计算机优秀性能来解决的工作，如铁路轨道的异物识别，线路支撑结构的异物识别，铁路沿线危树识别等等。而在绝缘子异常检测系统本身，绝缘子异常的检测本身在准确率和效率本身仍然有极大的提升空间。结合技术的更新发展，本文提出以下展望：

(1) 软硬结合提高系统识别效率

现有系统利用高速摄像头在铁路列车头前假设高速摄像机随着列车行进不断拍照而获得巡检图片，因此产生了大量的图片作为系统输入图像。绝缘子是线

路支撑结构上的零部件，在巡检图片中可能多次出现同一个绝缘子的照片，造成系统检测时耗费数以十倍以上的经历。在后续的工作中，可以考虑结合硬件在经过一个支撑结构拍摄一张照片，进而产生一系列数量相对较少的巡检图片作为系统的输入图像。

(2) 归并重复计算，剔除不必要计算

在本系统设计过程中，很多操作具有重复性，因此可以断言系统在归并重复运算后在效率方面有较大的提升空间。如过滤无效图片的过程中对图片做了一次遍历操作，对于有效图片而言后续操作仍然会做遍历运算。假如适当保留当前运算数据，合理利用计算机内存，可以很好的在效率上有进一步的提升。

(3) 系统业务功能可扩展性的提高

当前系统主要针对绝缘子的异常进行识别和检测，后续工作应该考虑在设计系统的过程中能够更好地兼容其他业务的设计开发。在扩展其他业务时可以更简易的做代码移植。

## 参考文献

- [1] 杨红梅. 基于图像处理的接触网支持及悬挂装置不良状态检测[D]. 西南交通大学, 2013
- [2] 刘宇红. 绝缘子在运行中的常见故障原因及预防措施[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(1):114-116.
- [3] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 清华大学出版社, 2006.
- [4] 高静辉. 输电线路绝缘子故障分析与检测方法综述[J]. 山东工业技术, 2016(15):165-166.
- [5] 赵必武. 一种基于多传感器的接触网动态检测装置[C]// 2013 年中国铁路电气化技术装备交流大会暨 2013 铁路电气化技术装备交流展示会. 2013.
- [6] 高晓蓉, 王黎. 弓网故障动态检测装置的原理及应用[J]. 机车电传动, 1999(1):33-35.
- [7] 岳路路. 基于机器学习的真菌孢子显微图像的特征提取与识别[D]. 西南大学, 2015.
- [8] Freund Y, Schapire R E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting[C]// European Conference on Computational Learning Theory. Springer-Verlag, 1995:119-139.
- [9] Freund Y. Experiments with a new boosting algorithm[C]// Thirteenth International Conference on Machine Learning. 1996:148--156.
- [10] 曹莹, 苗启广, 刘家辰,等. AdaBoost 算法研究进展与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(6):745-758.
- [11] 廖红文, 周德龙. AdaBoost 及其改进算法综述[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(5):240-244.
- [12] 秦海兵. 基于多核平台的程序并行优化研究[D]. 长安大学, 2012.
- [13] 冉晓龙. 基于多核多线程的混合并行编程技术研究[D]. 中原工学院, 2015.
- [14] David R. Buten. Programming with POSIX Threads[M]. China Electric Power Press, 2003
- [15] 丁怡心, 廖勇毅. 高斯模糊算法优化及实现[J]. 现代计算机, 2010(8):76-77.
- [16] 张斌, 贺赛先. 基于 Canny 算子的边缘提取改善方法[J]. 红外技术, 2006, 28(3):165-169.
- [17] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986, 8(6)
- [18] 李贞培, 李平, 郭新宇,等. 三种基于 GDI+的图像灰度化实现方法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(7):73-75.
- [19] Duda R O, Hart P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. Ijpsj Magazine, 1972, 15(1):11-15.
- [20] 陈仁杰, 刘利刚, 董光昌. 图像主特征直线的检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3):403-408.

- [21] 陈盖凯. 基于 Hough 变换的直线检测[J]. 西安航空学院学报, 2007, 25(3):34-36.
- [22] 吴铁洲, 熊才权. 直方图匹配图像增强技术的算法研究与实现[J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(2):59-61.
- [23] Stephens M. A Combined Comer and Edge Detector[J]. 1988.
- [24] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [25] 史海山, 吕厚余, 仲元红,等. 基于遗传神经网络的火灾图像识别及应用[J]. 计算机科学, 2006, 33(11):233-236.
- [26] 李志强, 李永斌. 车牌识别技术的发展及研究现状[J]. 科技信息, 2012(5):110-110.
- [27] 尹义龙, 宁新宝, 张晓梅. 自动指纹识别技术的发展与应用[J]. 南京大学学报自然科学, 2002, 38(1):29-35.
- [28] 邓耀华. 白细胞显微图像识别技术研究[D]. 广东工业大学, 2004.
- [29] 杨凌云. 基于多核技术的并行图像检索系统的研究[D]. 北京化工大学, 2009.
- [30] Viola P, Jones M J. Robust Real-Time Object Detection[C]// International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision -- Modeling, Learning, Computing, and Sampling. 2001:87.
- [31] 曹健. 人脸检测和识别系统的设计与应用[D]. 南京信息工程大学, 2013.
- [32] 林鹏. 基于 Adaboost 算法的人脸检测研究及实现[D]. 西安理工大学, 2007.
- [33] 李彦冬, 雷航. 多核操作系统发展综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9):3215-3219.
- [34] 汪松, 王俊平, 万国挺,等. 基于 SIFT 算法的图像匹配方法[J]. 吉林大学学报(工), 2013, v.43(S1):279-282.
- [35] 韩本慧, 李莹莹, 付萌. 图像降噪算法研究[J]. 城市建设理论研究:电子版. 2015(8).

## 致谢

时光荏苒，转眼间三年的研究生生涯即将结束。在这三年的研究生生活中，我最要感谢的是导师刘志镜教授。无论是在学习、生活、科研等方面刘老师都给与我极大的支持和帮助。本文是在导师的悉心指导下完成的，从论文的选题，参考资料的收集，论文结构的组织安排，到论文中语言的正确表达，刘老师都倾注了大量的心血。更重要的是刘老师严谨的治学态度、宽厚和谦虚的待人精神，都对我造成了积极的影响，使我终生受益。至此，再一次向刘老师表示深深的谢意。同时我还要感谢同窗好友们对我的大力支持，是他们让我能全身心的投入工作，顺利地完成硕士阶段的学习。

我还要感谢本实验室中为本项目做出共同努力的张沐杰、熊静博士、李金洋博士，我们一起工作、一起生活、一起解决项目中遇到的问题，让本科研项目得以顺利开发。同时，还要感谢实验室朝夕相处的同门师兄弟，他们分别是白振江、周夏冰、朱群、王炳华、闫玉华、宋佳宸、别芮、李景杰和蔡梦娇，正是和大家在实验室对算法和技术的讨论让我受益良多。

我还要特别感谢我的父母长期以来对我的无私付出，感谢他们为我所做的一切，正是他们的支持和理解让我坚持完成我的硕士学业。





## 作者简介

### 1. 基本情况

黄辉煌，男，福建泉州人，1991 年 11 月出生，西安电子科技大学计算机学院计算机技术专业 2014 级硕士研究生。

### 2. 教育背景

2010.08~2014.07 西安电子科技大学，本科，专业：计算机科学与技术

2014.09~2017.06 西安电子科技大学，硕士研究生，专业：计算机技术

### 3. 攻读硕士学位期间的研究成果

#### 3.1 参与科研项目

- [1] 陕西省迎宾书画院网站，项目时间 2015.03~2015.06，已投入使用。
- [2] 高铁接触网运行异常检测智能辅助系统，项目时间 2015.07~2016.01，已投入使用。
- [3] 网络化智能监控系统，项目时间 2016.04~2016.12，已完成。

#### 3.2 申请软件著作权

- [1] 高铁接触网运行异常检测智能辅助支持系统-智能自动初检系统（登记号 2016SR169061，原始取得）
- [2] 高铁接触网运行异常检测智能辅助支持系统-人工手动精检系统（登记号 2016SR20599 0，原始取得）

