



中南大学

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

# 本科毕业设计(论文)

GRADUATION DESIGN (THESIS)

题    目：    金锑浮选过程集中监视  
                    系统开发

学生姓名：    宣章洋

指导教师：    桂卫华、谢永芳

学    院：    信息科学与工程学院

专业班级：    测控技术与仪器 1101 班

本科生院制

2015 年 6 月

# 金锑浮选过程集中监视系统开发

## 摘要

多年来，泡沫浮选过程中都是通过人眼观测泡沫表面特征来判断浮选状况，经常出现由于人工的主观性或是经验不足而导致错误操作的现象。近些年，机器视觉技术日渐成熟，通过图像处理技术提取泡沫浮选图像视觉特征，便有了客观的参数来评判浮选状况，不光可以减少人为主观性的带来的错误，还大大减少了人力消耗。

在查阅大量文献了解了浮选监视系统的功能需求后，进而对系统做出总体设计，选用了基于 VC 的 MFC 框架进行软件开发。利用目前最流行的扁平化 UI 设计思想设计了系统的用户界面，改善了工业软件界面的视觉效果。

之后重点研究了图像处理技术，图像特征提取模块是本系统的开发的重点，也是难点。在开发此模块时，结合了当下最流行的开源机器视觉库 OpenCV 提高图像处理算法的执行速率并大大的缩短了软件开发周期。

因为工业系统实时性要求高，在系统中实现了基于 VC++ 的线程池技术，同时降低了系统的资源消耗。

最后研究并实现了简单的专家系统，加入了专家规则的监视系统，很大程度上减少了工人因经验不足而出现的误操作。

**关键词：**泡沫浮选 图像处理 线程池 专家系统

# Gold-Antimony flotation centralized monitoring system development

## ABSTRACT

For a long time, the status of the froth flotation process is determined by observing the foam surface characteristics through the human eye, that may result in incorrect operation because of the lack of experience or the subjectivity.

In recent years, machine vision technology is becoming mature. With the help of image processing technology to extract the visual features of froth flotation images there are objective parameters to evaluate flotation status, which not only reduce the human - oriented errors, but also greatly reduce the human consumption.

After consulting a lot of literatures so as to understand the function of the floatation monitoring system, thereby make the overall design of the system. MFC framework based on VC is selected to do software development. The user interface of the system is designed by using the most popular flat UI design so that the visual effect of the industrial software interface is improved. Then the emphasis is on the image processing technology. The image feature extraction module is the key point of the system. In the development of this module, use OpenCV to improve the execution rate of image processing algorithm and shorten the software development cycle.

Because of the high requirements of real-time industrial system, the thread pool technology based on VC++ is implemented in the system, which could reduce the resource consumption of the system as the same time.

Finally, a simple expert system is implemented. A system which the expert rule is added could reduce the workers' false operation due to the lack of experience.

**Key words:** Froth flotation Image processing Thread pool Expert system

## 目录

第一章 绪论 .....	1
1.1 浮选过程集中监视系统的重要意义.....	1
1.2 国内外研究现状与发展前景.....	1
第二章 浮选过程工艺.....	3
2.1 泡沫浮选生产过程原理与工艺.....	3
2.2 浮选泡沫特征的主要影响因素.....	4
2.3 表特浮选工况的泡沫表面视觉特征.....	5
第三章 金锑浮选过程集中监控系统总体设计 .....	7
3.1 系统需求分析.....	7
3.2 系统总体设计.....	8
3.3 系统模块组成.....	10
3.3.1 登录模块.....	10
3.3.2 数据与图像显示模块 .....	10
3.3.3 OPC 服务器通信模块.....	11
3.3.4 图像特征提取模块 .....	11
3.3.5 数据库模块.....	11
3.3.6 专家系统模块.....	11
第四章 金锑浮选过程集中监控系统的实现 .....	12
4.1 系统界面的实现.....	12
4.1.1 登录界面设计 .....	12
4.1.2 主界面设计 .....	13
4.1.3 监控视频实时显示的实现 .....	15
4.1.4 特征曲线图的实现 .....	15

4.2 系统与 OPC 服务器通信的实现 .....	16
4.3 系统浮选图像处理模块的实现 .....	17
4.3.1 OpenCV 的引入 .....	17
4.3.2 图像预处理 .....	17
4.3.3 颜色特征提取 .....	20
4.3.4 纹理特征提取 .....	22
4.3.5 速度特征提取 .....	23
4.3.6 形状特征提取 .....	26
4.4 线程池技术的实现 .....	28
4.5 数据库的设计与实现 .....	30
4.6 专家系统的实现 .....	33
第五章 总结与展望 .....	35
5.1 工作总结 .....	35
5.2 后期工作展望 .....	35
致 谢 .....	37
参考文献 .....	38
附 录 .....	39

## 第一章 绪论

### 1.1 浮选过程集中监视系统的重要意义

有用矿物大都蕴藏在各种矿石中，需要经过选矿提纯后才可使用，泡沫浮选是最常用的选矿方法，它是根据矿物颗粒物化性质相异来分离矿物，可用在几乎所有的矿石分选中。

泡沫浮选具有很长的工艺流程，影响因素很多，严重的非线性以及不能在线检测工艺指标导致很久以来一直依靠人工肉眼监测浮选槽中泡沫表面状态来判断浮选状况以完成现场操作，但是这种人工观察的方法具有主观性，难以实现客观的评价，从而容易导致浮选效果差，矿物流失严重，资源回收率低，化学药剂损失严重等情况。另一方面消耗人力比较大。近些年由于机器视觉的快速发展，以及其检测速度快，客观性强等优点，被大量使用在工业浮选中。工业视觉检测能够同时监测所有的浮选槽，减少了人力，并且可以量化描述泡沫表面的视觉特征。这些优点大大的增加了浮选的效率，使得精矿的品位和资源的利用率有了很大的提高。因此对于缺乏矿物资源的中国来说，研究基于图像处理的泡沫浮选监控技术是具有重大意义的。

### 1.2 国内外研究现状与发展前景

由于基于机器视觉的泡沫浮选过程监控技术有很大的优势，早在 20 世纪 90 年代初，就开始了对机器视觉在泡沫浮选中应用的研究。2000 年奥托昆普公司、瑞典皇家学院、芬兰赫尔辛基工业大学联合启动了 ESPRIT LTR 项目，泡沫浮选图像处理的原型便是在这个项目中开发出来的<sup>[1]</sup>。瓜里尼开始用摄像机通过视频采集卡将采集到的工业现场图像送入计算机，利用数字图像处理技术提取泡沫的大小，速度，亮度颜色等特征参数，并基于这些特征参数来评估浮选过程的质量，这算是比较完整的浮选泡沫图像过程

监控系统,在智利的一家大型铜浮选矿厂试验的数据也表明了此次取得了不错的结果<sup>[2]</sup>。Bonifazi 等人将分水岭图像分割算法应用到监视系统中。他还基于图像形态学特征分析方法建立了统计预测模型。并将这一模型应用在了 Pyhasalmi 和 Garpenderg 矿物浮选厂里。Kaartinen 通过计算 G、B、R 值的标准差和平均值得到浮选泡沫的颜色特征<sup>[3]</sup>,通过分层分水岭自适应分割算法提取了泡沫的平均大小,通过子块速度估计方法得到泡沫的速度与位移特征。

在国内,中南大学在泡沫浮选过程监控方面取得了许多研究成果。中南大学和中州铝厂长期合作,共同研发了“矿物浮选泡沫图像处理技术”,这一技术得到了与会专家的一致认可,该技术的主要性能指标明显比国外同类技术更优,达到了国际先进水平。

## 第二章 浮选过程工艺

### 2.1 泡沫浮选生产过程原理与工艺

泡沫浮选是将含有有价矿物的矿石粉碎，加入化学药剂后进行搅拌而产生泡沫，有用矿粒黏附在气泡上从而与杂质分离的过程。图 2-1 为泡沫浮选的原理图。

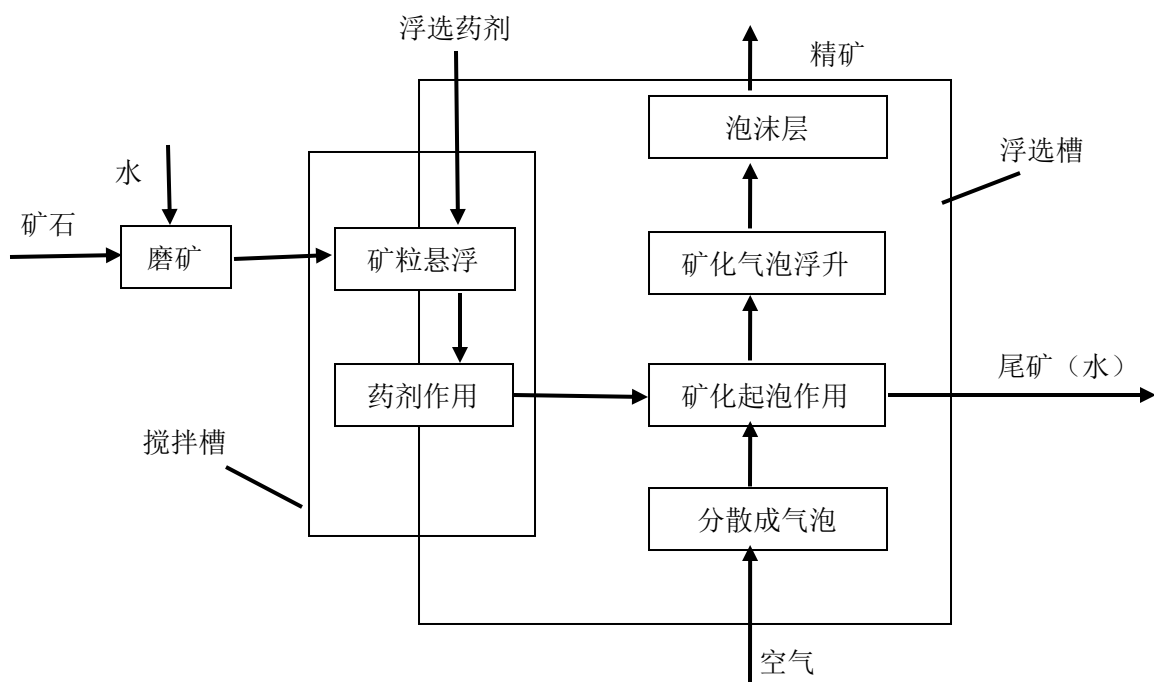


图 2-1 泡沫浮选原理

浮选过程中，将矿石磨成粉末状，加水使之成为矿浆，与浮选药剂调和后送入搅拌槽，充入空气激烈搅拌，产生大量气泡，由于药剂能够降低固液界面的自由能，使得目的矿物附着在气泡表面形成矿化泡沫层，最终泡沫层会用刮板刮出，从而得到了目的泡沫产品。

在浮选原理的基础上，经过不断的实践与探索，逐渐形成了一套浮选工艺。如图 2-2 所示为浮选工艺操作步骤示意图。



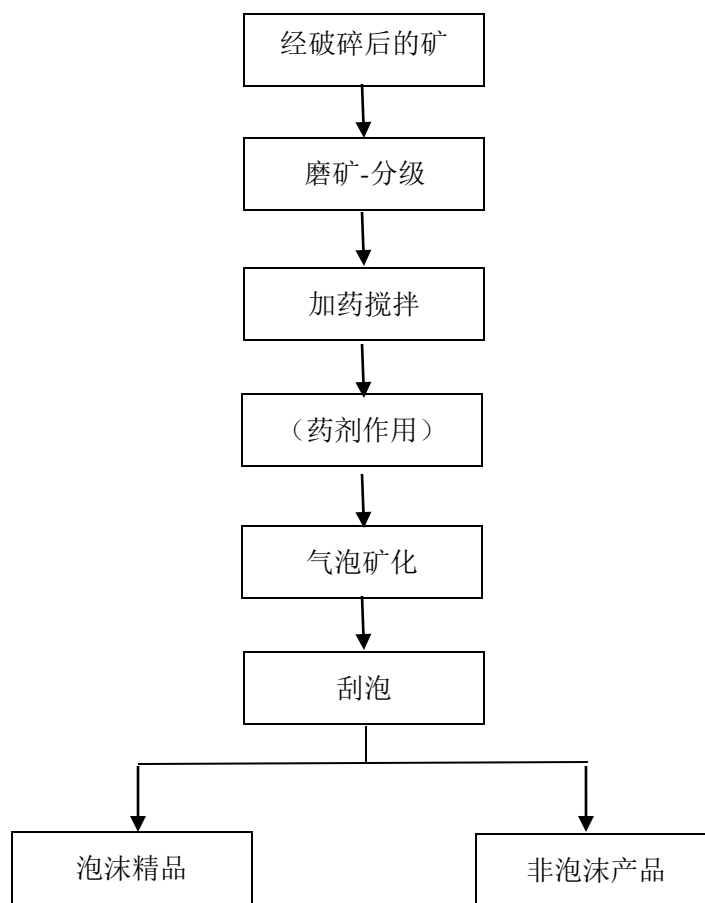


图 2-3 浮选工艺操作步骤示意图

不同的矿物，具体的浮选流程与工艺是不同的，但大体的操作步骤却都和上图相类似，而且浮选工艺是随着时间与浮选经验的增加而有所改变的，以期提高生产效率，降低生产成本。

## 2.2 浮选泡沫特征的主要影响因素

浮选泡沫的外观特征直接反映了浮选的效果，因此泡沫浮选监控系统依靠观测泡沫的外观特征来判断浮选的工况。泡沫的大小、形状、流速、数量、颜色等都会影响浮选工况。所以在浮选过程中得到良好的泡沫外观特征是非常关键的。能够通过改变物理化学因素来改变浮选泡沫的结构与外观特征。

化学因素主要是靠药剂调节，物理因素包括矿浆的浓细度，风压等。

(1) 浮选药剂。药剂的主要作用是降低固液界面的自由能，提高矿粒与气泡的黏附

度和矿物表面的疏水性，因此改善了气泡的稳定性并提高了浮选速度。浮选所用药剂按其作用可分成三大类：捕收剂，起泡剂，调整剂。捕收剂的作用便在于提高矿粒与气泡的黏附度，但过多的捕收剂会降低起泡剂的作用，控制捕收剂的用量须恰到好处。起泡剂增强了气泡的机械强度与表面弹性，因此能够防止气泡的相互融合。起泡剂的另一个作用是减慢了水份在泡沫中的蒸发速度。调整剂的作用是调节浆液中的 PH 值。矿浆的 PH 是影响浮选效果的重要因素，表面活性剂如捕收剂等仅在特定的狭小 PH 范围内才能发挥效果，严格控制矿浆的 PH 值是十分重要的。

### (2) 矿浆浓细度

磨矿需要适宜的细度，应避免过粉碎而导致的泥化现象。较粗的矿粒不容易悬浮，较细的矿粒表面积过大，容易黏着在粗粒表面，从而形成矿泥罩盖。由于较细的矿粒溶解度大，又容易被泡沫机械夹与水流机械夹带进精矿中。

### (3) 风压

为了产生泡沫，浮选中要边往矿浆中充入空气边进行激烈搅拌，充气量的多少都会影响浮选效果。充气量大时泡沫产生快，泡沫速度较快，矿粒与气泡接触时间短，气泡的矿化程度低。充气量小时，泡沫少，泡沫速度较慢，影响浮选效率。将风压控制在适当的范围内能够提高泡沫的稳定度和泡沫的大小。

## 2.3 表特浮选工况的泡沫表面视觉特征

泡沫浮选过程集中监视系统依靠监视泡沫表面的物理特征来判断浮选的状态，现场采集的泡沫泡沫图像噪声大，灰度值偏低，并有大量的阴影和气泡亮点，需要采用图像处理技术对泡沫图像进行去噪和光照补偿等预处理。

浮选泡沫视觉特征众多，常用的特征分为形状特征，颜色纹理特征，动态特征三大类。

### (1) 形状特征

形态特征主要包括浮选气泡的大小，面积，椭圆率以及气泡的统计分布规律等。形

态特征影响泡沫携带矿物的多少<sup>[4,5]</sup>，中等尺寸的均匀椭圆气泡会带有较多矿物，通过观察气泡尺寸大小也可以预测出矿浆 PH 值的大小，通常气泡偏大时，相对应的 PH 值往往也是偏高的，气泡偏小，PH 值可能偏低<sup>[6]</sup>。因此形态特征是监控系统需要监测的一个重要指标。

## (2) 颜色及纹理特征

因物质的结构不同，对光的吸收能力不同，导致其表面颜色不同。在泡沫浮选中，利用这一特性，通过观察气泡表面颜色可预测出气泡表面所携带的矿物粒子的种类与含量，即可以判断浮选的状态<sup>[7-9]</sup>。

加药量不同时，通常泡沫会呈现不同的纹理。纹理越细，图像的灰度值越均匀，表明工况也越稳定，当工况波动时，容易造成气泡虚大，纹理较粗。这样通过监测气泡的颜色和纹理可以预测实时工况。

## (3) 动态特征

动态特征主要是指泡沫的表面流速与泡沫的稳定度。矿浆的 PH 值影响了矿浆的浓度，从而影响泡沫的流速，通常 PH 值较低时，矿浆浓度较低，泡沫流速快，相对应的，PH 较高时，矿浆浓度高，泡沫流速就会相对较慢。而泡沫流速的快慢影响着其与矿物粒子碰撞的时间<sup>[10]</sup>，从而影响了泡沫携带矿粒的多少，这在很大程度上影响了浮选效率与精矿品位。不仅如此，泡沫流速还影响矿物的回收利用率。泡沫的稳定度低时，表明泡沫破裂严重，导致气泡表面的矿粒又掉入浮选槽底部<sup>[11]</sup>，造成资源浪费。监测泡沫的速度和稳定度对预测浮选工况有很大的意义。

## 第三章 金锑浮选过程集中监控系统总体设计

金锑浮选过程集中监视系统是一个软件系统，在进行软件开发前期，对系统的需求必需要进行准确的分析，从而再对整个系统做出一个总体设计方案。只有需求分析越到位，软件后期的调试与改动才会越少。总体设计方案是对全局的把握，是一个软件的框架。从抽象的层次分析对比多种可能实现的方案，并选择出最合理的软件结构。一个好的总体设计方案可以使得开发过程事半功倍，大大的减少开发的周期与开发中的成本，并提高软件的质量。

### 3.1 系统需求分析

浮选监控系统是一个工业级的系统，其功能必须满足浮选工艺的要求。监测系统需要获取现场浮选槽的视频，这可以在浮选槽上安装摄像机获取浮选槽内的实时泡沫图像，再传输至监控计算机。

跟据监测系统的工业应用需求，以及泡沫浮选的工艺特点，泡沫浮选过程监视系统应有以下几个功能：

- (1) 浮选视频实时播放：实时播放摄像机拍摄的浮选槽浮选视频，并且要有暂停，继续与保存视频，暂停时可以放大泡沫图像。
- (2) 特征值实时显示：所提取的泡沫图像视觉特征参数与浮选工艺预测参数实时显示。
- (3) 特征值曲线图绘制：动态绘制特征值曲线图，以及工艺预测值曲线图。
- (4) 操作建议与专家系统：根据浮选图像特征参数利用专家系统对现场操作提出控制策略，并显示在操作建议界面。专家系统界面可以录入、修改与删除专家知识。
- (5) 数据库管理：存储浮选图像特征参数以供随时查询。

(6) 工况异常报警：工况异常时自动报警，并显示异常的原因以及紧急操作提示。

(7) 实时性需求：所有工业系统必需满足这一点要求，因图像处理速度慢，系统可采用线程池技术来解决实时性问题。同时选择好的算法也可提高系统的实时性。

### 3.2 系统总体设计

系统总体设计包括系统结构框架的设计与系统流程的设计。通过对系统需求分析，设计了几个结构框架后，筛选出了如图 3-1 的软件总体结构图，这个结构设计全面包括了系统的需求，并且结构清晰易于实现。

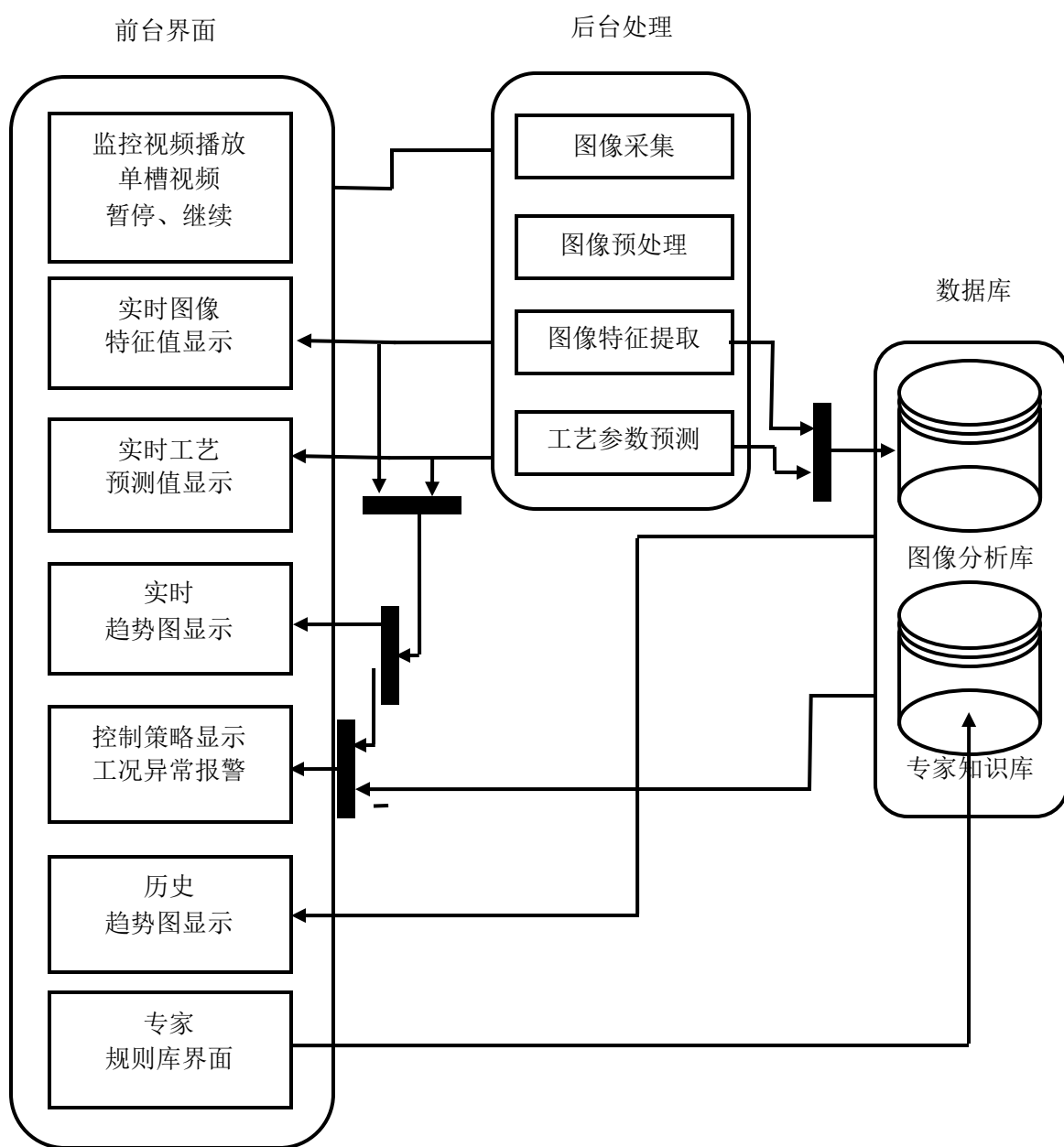


图 3-1 软件总体结构图

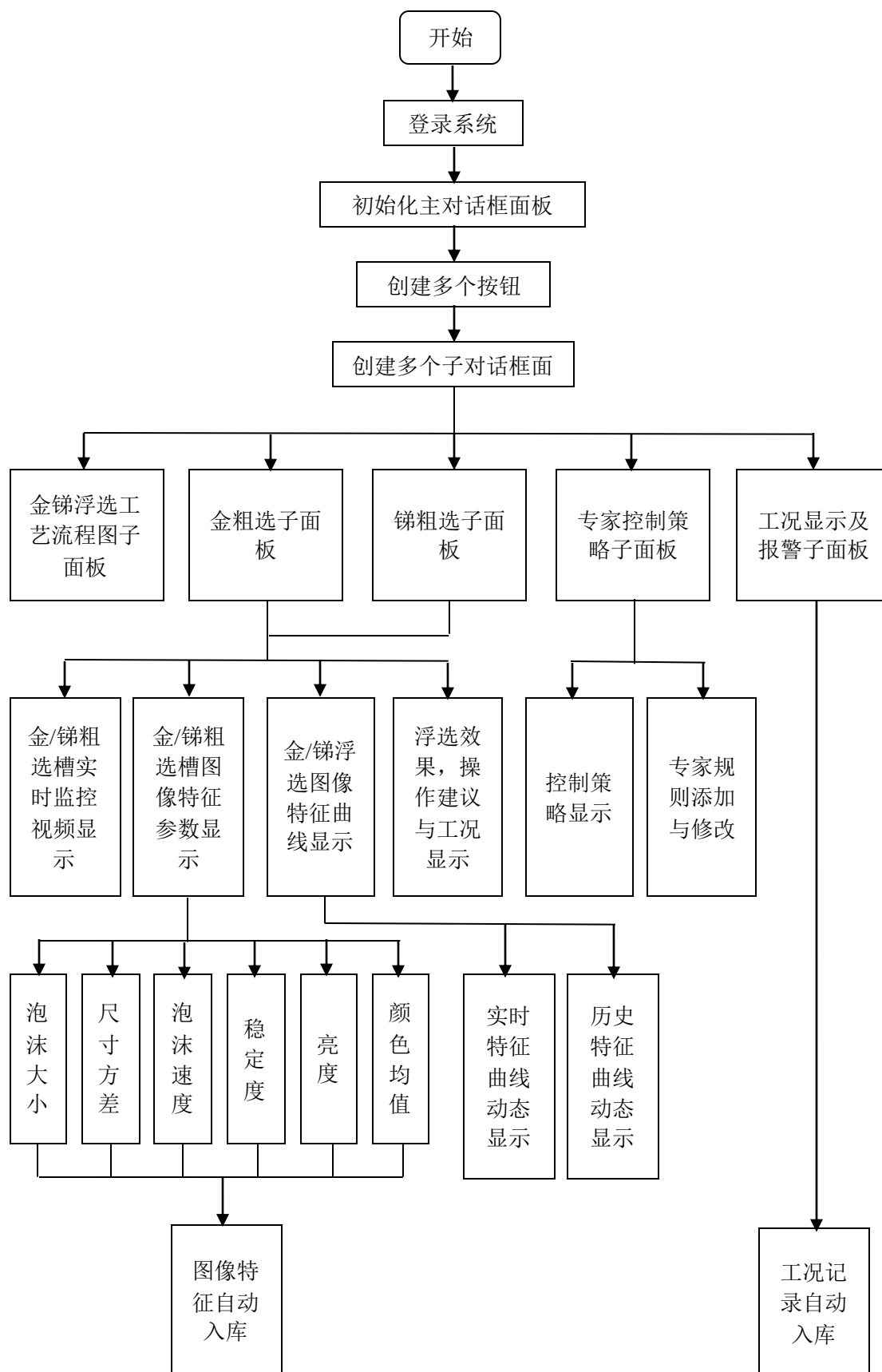


图 3-2 软件流程图

软件的流程设计是非常关键的一个步骤，系统的流程如图 3-2 所示。流程简要描述如下：

- (1) 进入登录界面登录到系统。
- (2) 创建主对话框界面，创建各子对话框界面。
- (3) 第一个子对话框显示浮选工艺流程图。
- (4) 第二（三）个子对话框播放金（锑）浮选实时视频，从视频的浮选图像中提取各个特征并进行显示，然后显示其曲线图。显示实时工况与操作建议。
- (5) 第四个子对话框根据当前的浮选图像特征值基于专家系统提出控制策略并显示。并有专家规则的添加，修改与删除功能。
- (6) 第五个子对话框显示详细的实时工况，并有工况异常报警功能。

### 3.3 系统模块组成

本系统的功能模块包含了登录模块，OPC 通信模块，图像特征提取模块，数据库模块，专家系统模块，其中图像特征提取模块是本系统最重要的模块。下面是对各个模块的一个简单介绍。

#### 3.3.1 登录模块

操作人员必须拥有自己的账号和密码方能进入系统。登录模块获取从用户输入的用户名与密码，然后去数据库查询此用户名，并比对密码，相同则登录成功，进入系统主界面，不同则提示错误。

#### 3.3.2 数据与图像显示模块

无论是工业现场浮选的实时视频还是从视频图像中提取的图像特征，以及根据图像特征基于专家系统提出的优化控制策略，都要通过数据与图像显示模块呈现给用户。由于浮选现场有多个浮选槽，所以图像显示模块分为单槽显示和多槽显示，单槽显示时可以通过选择浮选槽号来快速切换监视的浮选槽。多槽显示则是单独的界面同时显示多个

槽的实时浮选视频，与其相对应的槽号，点击某个具体的槽，则会转到对应槽的单槽显示状态。在单槽显示状态时，界面同时会显示当前槽浮选图像的特征参数与特征曲线。

### 3.3.3 OPC 服务器通信模块

OPC 的全称是 OLE for Process Control, 用于过程控制的 OLE, 以 OLE/COM 机制作为应用程序的通讯标准, OPC 服务器直接与下位机连接(仪器仪表等), 获取一些工业参数并存储。远程端可采用 C/S 的方式去读取工业现场 OPC 服务器上的实时参数。

### 3.3.4 图像特征提取模块

整个监视系统最重要的功能模块便是图像特征提取模块, 利用机器视觉代替人工操作的主体部分便是这一模块。图像特征提取同时是相对于其它模块来说最难实现的模块, 也是系统运行最耗时的模块, 本系统需要提取的特征较多, 因此这一模块的设计直接影响系统的实时性。另外为了保证系统的质量, 提取相对较精确的图像特征是十分重要的。设计图像特征提取模块时, 采用线程池技术来解决系统实时性问题。选择好的图像处理算法不止可以提高图像特征提取的精确度, 还可以大大的提高特征提取的速度。

### 3.3.5 数据库模块

工业中的一些数据是十分有用的, 需要保存某些有用的数据以供日后分析使用, 例如本系统中提取的图像特征参数与一些预测的工艺指标(如 PH 值)能够为以后研究泡沫浮选图像处理提供数据, 因此存储这些数据是十分必要的。采用数据库的存储方式有着查询速度快, 可维护性强等优点。本系统需要存储的内容有浮选图像特征与工况日志。

### 3.3.6 专家系统模块

专家系统是将相关领域的专家多年积累的专业经验知识写入规则库, 利用计算机技术, 甚至是人工智能技术, 跟据专家规则库模拟人类专家决策的过程<sup>[12]</sup>。加入了专家规则的系统能够解决需要专业经验的复杂问题。对于泡沫浮选系统来说, 加入专家系统能够基于提取的图像特征提出专家级的优化控制策略, 极大的减少了因工人经验不足而导致的误操作, 有效提高了浮选效率与质量。



## 第四章 金锑浮选过程集中监控系统的实现

系统基于 MFC 框架的 VC 设计实现，并使用 VS2013 IDE 环境。VS2013 集成环境相对于传统的 VC++6.0 编程环境有着操作简洁、功能更加强大等优点，方便系统的开发。

### 4.1 系统界面的实现

软件设计可分为两大部分，界面设计与功能设计，界面是人与机器之间传递信息的接口，界面的设计要求用户操作便捷，容易上手，布局要合理，需要符合使用习惯。随着互联网时代的到来，越来越多的用户喜欢简单、简洁的人机界面，而非炫酷的界面。工业软件中更是不允许复杂炫酷而不适用的界面。在设计本系统人机界面时，采用了现在最流行的扁平化设计，在不违背工业软件设计规则的前提下，很大程度上优化了系统的视觉效果。

#### 4.1.1 登录界面设计

登录界面是系统的入口，界面效果见附录中的图 1。

登录界面是 MFC 的对话框，MFC 中每个对话框都是以一种资源的形式存在，对应的有一个唯一的资源标示，登录对话框的资源表示为 IDD\_LOGINDLG。登录界面的初始化选择放在主对话框初始化函数 CMonitorSYSDlg::OnInitDialog() 中，对话框有模态与非模态之分，模态对话框是阻塞型的<sup>[13]</sup>，只有当此模态对话框退出后才会继续往下执行，而非模态对话框是并行的，在本系统中登录对话框是模态的，只有当登录对话框退出才能继续初始化系统主界面。登录对话框退出的前提是当用户输入的用户名与密码都正确，然后使用回调函数 OnCancel() 退出登录界面（因为是模态的，所以可以使用 OnCancel() 函数退出）。登录界面去掉了 windows 默认的边框，为了让对话框可以被拖

动(对话框默认只有点击边框才能被拖动),重载了 `OnNcHitTest(CPoint point)` 函数,使用 `return (nHitTest == HTCLIENT) ? HTCAPTION : nHitTest` 语句实现。界面背景色的绘制是由回调函数 `OnCtlColor(CDC* pDC, CWnd* pWnd, UINT nCtlColor)` 中的 `if (nCtlColor == CTLCOLOR_DLG) return m_brush` 代码实现的,其中 `m_brush` 是登录对话框的 `CBrush` 型成员变量,在对话框初始化调用 `m_brush.CreateSolidBrush(RGB(69, 159, 134))` 将 `m_brush` 初始化为相应颜色。

这种扁平化的设计需要对各控件进行重绘,而且颜色的搭配要合理。界面中的按钮控件与编辑框控件都是使用网络上现有的最流行的控件类进行控件重绘。

界面上的按钮重绘使用的是 `CButtonST` 类,将网上下载的 `BtnST.h`, `BtnST.cpp`, `BCMenu.h`, `BCMenu.cpp` 文件导入工程,并将按钮绑定 `CButtonST` 型的变量即可对按钮进行各种美化操作。`CButtonST` 类功能强大,可以在按钮上同时显示图片与文字,如登录界面上编辑框上方的静态文本与图片就是用 `CButtonST` 型的按钮的 `m_btcsu.SetIcon(IDI_CSU);m_btcsu.SetAlign(CButtonST::ST_ALIGN_HORIZ)` 两个调用来实现的,`m_btcsu` 绑定为 `CButtonST` 型的成员变量。登录界面还有登录按钮,最小化按钮与推出按钮,都是利用 `CButtonST` 类进行重绘。在登录按钮的监听器中获取输入框中的用户名与密码,然后查询数据库中的此用户名,并比较密码,相同则退出登录界面,不同则弹出提示框。输入用户名与密码的控件是编辑框,使用了网上的 `CDLEdit` 类进行重绘,直接在工程中导入 `DLEdit.h` 与 `DLEdit.cpp` 两个文件即可使用。`CDLEdit` 类可以将其 `m_strGrayString` 成员变量赋值一个字符串即可为编辑框控件添加提示文字,绑定了 `CDLEdit` 型的编辑框会有默认的鼠标进出特效。后面的主界面设计中很多设计都使用了与登录界面相同的 UI 设计方法。

#### 4.1.2 主界面设计

主界面是由一个主对话框和五个子对话框组成,五个子对话框分别由主对话框上的五个按钮控制轮流显示在主对话框上,实现了选项卡的效果,主界面见附录中的图 2 所

示。

主对话框的资源 ID 号为 IDD\_MONITORSYS\_DIALOG，在登录对话框正确退出后便初始化主对话框，初始化主对话框中也会创建所有的子对话框，这样所有的子对话框在主对话框初始化时便已经存在于内存中，这种方式比较消耗内存资源，但是子对话框之间的切换会更加流畅，图像处理不会在子对话框切换时中断，这种以内存换取运行速度的方式运用在工业系统中可以提高系统的实时性。

主对话框上除了显示子对话框外，在主对话框的下方还会实时显示系统的已运行时间，系统时间，工况，系统标签，它们都是使用 CButtonST 重绘过的静态按钮（即不可用的按钮）。其中系统时间的显示是在 MFC 的定时器响应函数 OnTimer() 中调用获取系统时间函数 CTime::GetCurrentTime() 来实现。当前系统时间减去登录时记录的系统时间即得到系统运行时间。

主对话框上有五个子对话框，以按钮切换的方式实现选项卡功能，各子对话框实现系统的子模块功能。第一个子对话框是显示动态浮选工艺流程图，界面见附录中的图 2 所示，对话框资源 ID 号为 IDD\_PROCESSDIAGRAM，动态浮选工艺流程图的显示实现是利用 MFC 的定时器将 3 张图片每隔 500 毫秒循环显示。对话框位图的显示用到了双缓冲绘图技术，可以有效防止图片闪烁。LoadBitmap() 函数载入位图资源后由 StretchBlt() 函数将内存中的图片缓冲拷贝出来并根据对话框的长宽比例将图像适当伸缩。第二和三个子对话框是金和锑粗选模块，界面见附录中的图 3 和图 4 所示，其资源 ID 分别为 IDD\_GOLDDLG 和 IDD\_ANTIMONYDLG，这两个子对话框的功能是相同的，仅仅是金浮选与锑浮选的区别。粗选模块包括浮选监视视频实时播放、图像特征提取与显示，图像特征曲线动态绘制，工况概览子模块。第四个子对话框是优化操作策略建议的实现，其资源 ID 号为 IDD\_OPTIMIZECTRLDLG，界面见附录中的图 5 所示。最后一个子对话框是实现工况显示与工况异常报警显示，其资源 ID 为 IDD\_CONDITIONDLG。

#### 4.1.3 监控视频实时显示的实现

视频监视实时显示是在金与锑粗选子对话框中实现的,包括金粗选实时监视视频与锑实时监视视频的播放,实时视频播放图见附录中的图 6 所示。视频播放用到了 opencv 开源视觉库,实时监控的原理是一帧一帧地在 MFC 的 pic 控件上播放现场通过摄像头传递过来的画面。Opencv 的 VideoCapture capture()代码用来打开摄像头,并将每一帧保存在 capture 中,在 opencv2.0 中,图片都是以矩阵的形式存储,定义一帧 Mat frame,代码 capture >> frame 将摄像头传递过来的画面的一帧放在 frame 中,然后将这一句代码放入 while 循环中实现循环读取摄像头传递的画面。将每一帧 frame 显示在 pic 控件上需要用到 opencv 的 CvImage 类的 DrawToHDC()方法,但是 CvImage 类在 opencv2 中不再使用,需要单独将 CvImage.h 与 CvImage.cpp 文件导入工程中使用,在使用 DrawToHDC()之前需要将 Mat 型的图片转换为 IplImage 型,然后调用 CvImage 类的 CopyOf()函数将 IplImage 型的图片转换为 CvImage 型的图片,之后才能通过 DrawToHDC()函数将每一帧显示在 pic 控件上。

#### 4.1.4 特征曲线图的实现

特征曲线图包括趋势图和历史曲线图,趋势图见附录中的图 7 所示,特征曲线图需要动态绘制。曲线图绘制使用网络上开源的 Hight-Speed Charting 高速绘图控件,该控件使用简单。使用该控件的步骤如下:

(1) 在项目工程下导入 ChartClass 文件夹内的源文件。

(2) 在 MFC 资源对话框中拖入 Custom Control 控件将其 Style 属性改为 0x52010000, Class 属性改为 ChartCtrl。

(3) 为 Custom Control 控件绑定 CChartCtrl 型的变量 m\_chartCtrl。

(4) 为曲线图添加数值型的坐标轴与标题。

```
CChartAxis *pAxis = NULL;  
pAxis = m_chartCtrl.CreateStandardAxis(CChartCtrl::BottomAxis);  
pAxis->SetAutomatic(true);  
pAxis = m_chartCtrl.CreateStandardAxis(CChartCtrl::LeftAxis);
```

```
pAxis->SetAutomatic(true);  
m_chartCtrl.GetLeftAxis().GetLabel().SetText(str);
```

(4) 用类 CChartCtrl 的 CreateLineSerie()函数即可创建一个线图, 用 AddPoints 函数把数组的数据画出来。

```
CChartLineSerie *pLineSerie1;  
m_chartCtrl.RemoveAllSeries();  
pLineSerie1 = m_chartCtrl.CreateLineSerie();  
pLineSerie1->SetSeriesOrdering(poNoOrdering);  
pLineSerie1->AddPoints(x, y, 100);
```

其中 x,y 都是一维数组, 为曲线图的横纵坐标。

上面实现了曲线的静态绘制, 使用系统的定时器 Timer 实现动态曲线图的绘制。动态图是在静态绘制的基础上每隔一段时间刷新一次绘图过程, 改变 x 和 y 的值。

#### 4.2 系统与 OPC 服务器通信的实现

与 OPC 服务器通信需要用到微软的 COM 库, 使用 COM 开发首先要通过类厂对象创建 OPCServer 对象, 由 OPCGroup 对象的 IUnknown 接口查询到 IOPCServer 接口, 再通过调用这一接口根据客户需要增加多个 OPCGroup 对象; 这样 OPC 客户就可以通过创建的 OPCGroup 对象调用 IOPCItemMgt 接口增加实际数量的 Item 对象<sup>[14]</sup>; 即创建 OPCItem 对象; 接着通过调用 OPCGroup 对象的 IOPCSyncIO 接口成员函数 Read 和 Write 同步读写该组所包含的 Item 对象的属性, 即实际数据值; 最后 OPC 客户在退出时释放所有的接口并依次删除 OPCItem、OPCGroup 和 OPCServer 对象。客户端程序与 OPC 数据存取服务器连接的过程:

1. 初始化 COM 库。使用 CoInitialize()函数初始化 COM 库。
2. 创建 Server 对象。使用 CLSIDFromProgID()与 CoCreateInstance()函数创建 Server 对象。
3. 获得 IOPCServer 接口。QueryInterface()函数用来获得 IOPCServer 接口。
4. 添加组。AddGroup()函数用来添加组。
5. 添加其他接口。依然使用 QueryInterface()函数添加其他接口。

### 4.3 系统浮选图像处理模块的实现

#### 4.3.1 OpenCV 的引入

OpenCV 是一个用 C/C++ 编写的开源计算机视觉库，提供了许多关于图像处理，模式识别，三维重建，目标跟踪，机器学习和线性代数的算法<sup>[15]</sup>。OpenCV 利用 Intel 的 MMX 与 SSE 技术优化图像处理的算法，大大提高了图像处理的速度。将 OpenCV 引入泡沫浮选过程监测系统开发，一方面可以减少开发周期，另一方面 OpenCV 处理图像速度快，可以保证系统的实时性。

在 OpenCV1.0 中，图片存储在 `IplImage` 结构中，`IplImage` 结构来源于 Intel 的另外一个函数库 Intel Image Processing Library (IPL)，该函数库主要针对图像处理。到 OpenCV2.0 后，图片统一改为 `Mat` 的存储方式，`Mat` 侧重于数据操作，其最大的好处就是能够更加方便的进行内存管理，不再需要程序员手动管理内存的释放。OpenCV 中对摄像头的操作十分简单，`VideoCapture capture()` 一句代码即可方便的打开摄像头，`capture >> frame` 一句代码便获取到摄像头拍摄的一帧画面。之后便可调用 OpenCV 中的各种图像处理算法对 `frame` 进行图像处理以提取图像特征。

使用 OpenCV 之前需要安装 OpenCV 库，并搭建 OpenCV+VS2013 环境，将 OpenCV 库文件与头文件路径添加到工程相应属性中即可。

#### 4.3.2 图像预处理

由于工业现场环境影响，获取到的泡沫图像存在大量的噪声，并且光照不均匀<sup>[16]</sup>，这将导致后面的图像特征提取过程变得很艰难，因此在特征提取之前需要对浮选图像进行预处理，先筛选出清晰的图像，再对图像去噪，最后进行光照补偿。

##### 1. 图像自动筛选

图像的自动筛选是选取某一时刻附近较清晰的图像，模糊的图像会导致后续特征提取失败。筛选出清晰的图像需要对图像的模糊度作出评价，常用的模糊评价函数有 Laplacian 函数、灰度差分绝对值之和(SMD)、灰度方差、TenenGrad 函数、平方梯度函



数和图像变换函数等<sup>[17]</sup>。本系统采用 TenenGrad 函数、平方梯度函数与自适应加窗梯度函数加权求和，其权值分别为  $w_a=0.4$ ， $w_b=0.3$ ， $w_c=0.3$ 。下面介绍这三个函数

(1) TenenGrad 函数。模糊度定义为：

$$F_{TenenGrad} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_x^2(x,y) + f_y^2(x,y)]^{1/2} \quad (4-1)$$

其中：

$$f_x(x,y) = f(x,y) * K_x, \quad f_y(x,y) = f(x,y) * K_y$$

$f(x,y)$  为点  $(x,y)$  处的灰度值， $K_x$  与  $K_y$  为 Sobel 模板算子， $M*N$  为图像尺寸。

(2) 平方梯度函数。模糊度定义为：

$$F_{sq-grad} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x,y+1) - f(x,y)]^2 \quad (4-2)$$

(3) 自适应加窗梯度函数。加窗示意图如图 4-1 所示，

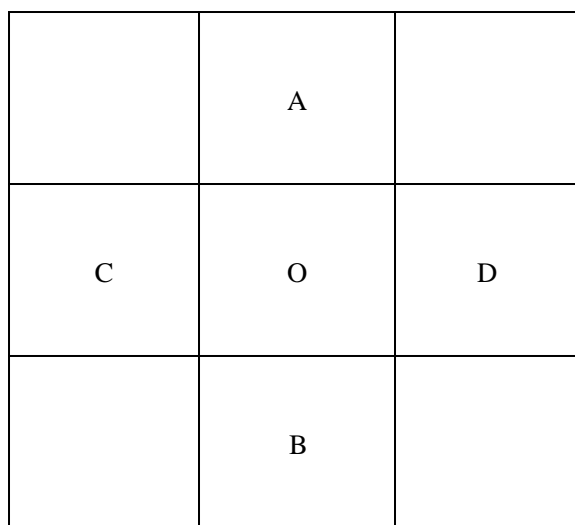


图 4-1 区域加窗示意图

加窗梯度函数如式(4-3)和(4-4)所示：

$$f(I) = w_1 * f_T(O) + w_2 (f_T(A) + f_T(B) + f_T(C) + f_T(D)) \quad (4-3)$$

$$f_T(O)(I_R) = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \{ [I_R(x+1,y+1) - I_R(x,y)]^2 \} \quad (4-4)$$

式中  $I$  表示整个图像， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $O$  表示  $I$  的子区域， $I_R(x,y)$  表示子图像

点  $(x,y)$  的灰度值， $w_1$  和  $w_2$  分别为中心子块的加权和非中心子块的加权， $W*H$  为子块大小。

这种使用组合函数来自动筛选图像的算法准确率可达到 95%，算法的实现主要包括四个函数，`filtrateImg(Mat img)`，`tenenGrad(Mat img)`，`sqgrad(Mat img)`，`wingrad(Mat img)`。`tenenGrad` 为 TenenGrad 评价函数，`sqgrad` 为平方梯度评价函数，`wingrad` 为自适应加窗梯度评价函数，`filtrateImg` 为组合函数，在它内部调用另三个评价函数，这四个函数的输入参数都是灰度图像。

## 2. 图像降噪

图像降噪所采用的方法是对图像进行形态学开闭运算，所谓开运算就是将图像先腐蚀后膨胀的过程，开运算用来消除高于邻近点的孤立点，去除小的明亮区域，并且剩余的明亮区域被隔绝，但是其面积不变。闭运算则是先膨胀后腐蚀的过程，闭运算能够排除小型黑洞。通过形态学的开和闭运算后可以去除泡沫图像中的低谷与尖峰噪声。OpenCV 中的 `morphologyEx` 函数用来实现形态学学开闭运算，其第三个参数 `op` 取 `MORPH_OPEN` 时为开运算，取 `MORPH_CLOSE` 时为闭运算。

经过开闭运算前后的泡沫图像对比如图 4-2 与 4-3。

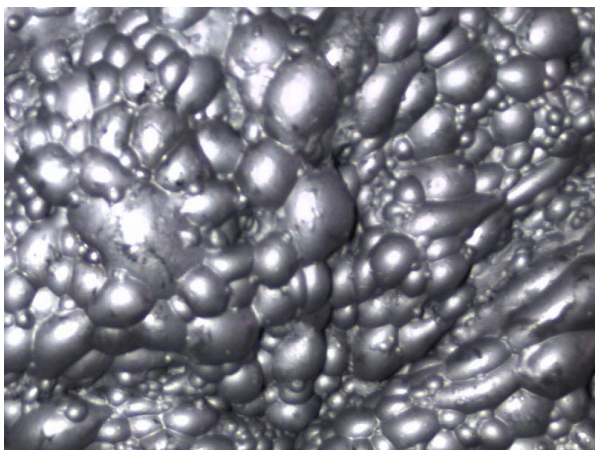


图 4-2 原始泡沫图像



图 4-3 经过形态学开闭运算后的泡沫图像

## 3. 光照补偿

对图像进行光照补偿前需要对图像进行粗分割，以避免直接光照补偿而出现“光晕”现象。对图像粗分割采用的是快速自适应阈值分割法，其算法步骤是遍历图像的像素，以这些像素点为中心，计算  $7 \times 7$  矩形范围内的平均像素值，若相当点像素值与  $7 \times 7$  范围



内的平均像素值之比小于 15% 时, 则把当前点置为黑色, 反之则置为白色。调用 OpenCV 中的 `cvAdaptiveThreshold` 即可以实现图像的自适应阈值分割。粗分割后再对图像进行光照补偿, 光照补偿采用多尺度 Retinex 算法(MSR), 本系统采用相同权值的三尺度高斯卷积核, 三个尺度分别为 40, 200, 350。对每个尺度累加计算  $\text{Log}[R(x,y)] = \text{Log}[R(x,y)] + w * (\text{Log}[I_i(x,y)] - \text{Log}[L_i(x,y)])$ , 其中  $w$  表示对应尺度的权重, 这里由于是等权重, 故  $w=1/3$ ,  $I(x,y)$  是原始图像,  $L(x,y)$  代表环境光分量, 可由  $I(x,y)$  经高斯滤波得到。最后将  $\text{Log}[R(x,y)]$  量化到 0-255 之间作为输出。图像光照补偿实现函数为 `MultiScaleRetinex(Mat img, int scales, double *weights, double *sigmas, int gain, int offset)`。图像光照补偿前后对比见图 4-4 与 4-5。



图 4-4 原始泡沫图像

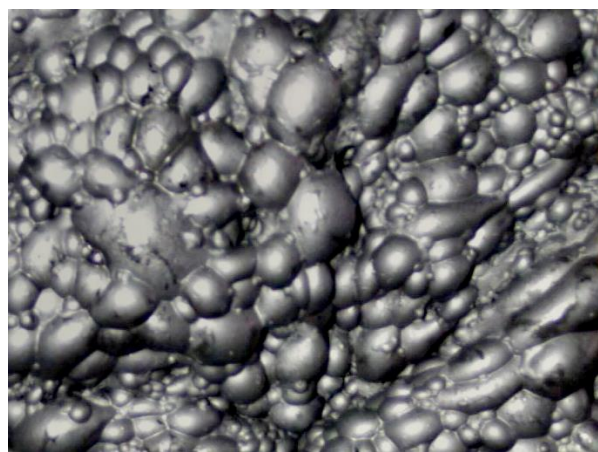


图 4-5 经过 MSR 算法光照补偿后的图像

### 4.3.3 颜色特征提取

不同矿物或是相同矿物在不同浮选工况下因对光线的吸收不同从而导致浮选泡沫表面的颜色不同, 因此通过观察泡沫表面的颜色可以预测相前的工况。

因为工业现场光照不均匀以及泡沫表面粗糙和图像的倾斜, 气泡顶部会出现亮点, 亮点会遮盖住大量的颜色信息, 在提取颜色特征之前需要移出亮点。移出亮点通常所采用的方法是图像修复技术。本系统所使用的算法是由 Chan 提出的全变差修复模型。算法封装在 `chan(Mat inimg, Mat outimg)` 中。

颜色有很多模型, 最常见的是 RGB 颜色空间, 其次还有 HSV 以及 Lab 颜色空间

等。

## 1. RGB 颜色空间

R、G、B 分别表示 Red(红)、Green(绿)、Blue(蓝)三个颜色通道，每个通道的值从 0-255，三个通道的值混合即为采色值，这种颜色的表示方法简单，却缺乏直观感。现在很多图像采集设备以及图像显示设备都使用的是 RGB 颜色空间。

## 2. HSV 颜色空间

H、S、V 分别表示 Hue(色调)、Saturation(饱和度)、Value(亮度)。Hue 表示颜色，Saturation 表示色彩的深浅，Value 表示色彩的明亮程度。HSV 颜色空间与 RGB 颜色空间的转化关系如式(4-5)所示：

$$\begin{aligned} V &= \frac{R + G + B}{3} \\ S &= 1 - \frac{3}{R+G+B} (\min(R, G, B)) \\ H &= \cos^{-1} \left[ \frac{(R - G) + (R - B)}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right], R \neq B \text{ 或 } G \neq B \end{aligned} \quad (4-5)$$

## 2. Lab 颜色空间

Lab 颜色空间与具体设备无关，在不同设备之间通过 Lab 颜色空间传输颜色不会造成失真。L 表示明度，其范围是 0-100，表示从黑到白，+a 为红色，-a 为绿色，+b 为黄色，-b 为蓝色<sup>[18]</sup>。从 RGB 到 Lab 空间的转换如式(4-6)所示：

$$\begin{cases} g(x) = \begin{cases} 4.5318x, & x < 0.018 \\ 1.099x^{0.45} - 0.099, & x \geq 0.018 \end{cases} \\ [X \ Y \ Z] = [r \ g \ b] \times \begin{pmatrix} 0.4125 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \\ XYZ \rightarrow Lab: \begin{cases} L = 116f(y) - 16 \\ a = 500(f(x) - f(y)) \\ b = 200(f(y) - f(z)) \end{cases} \end{cases} \quad (4-6)$$

其中  $r=g(R), g=g(G), b=g(B), x, y, z$  是 X, Y, Z 的归一化， $f(x)$  如式(4-7)所示：

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.00856 \\ 7.787x + \frac{4}{29}, & x \leq 0.00856 \end{cases} \quad (4-7)$$

使用单一的颜色空间难以提取准确的颜色特征，在本系统的颜色特征提取算法中使用

了多颜色空间信息融合技术，在 RGB 颜色空间提取 R 分量，在 HSV 颜色空间提取 H 分量，在 Lab 颜色空间提取 a 分量，融合原理如图 4-6 所示：

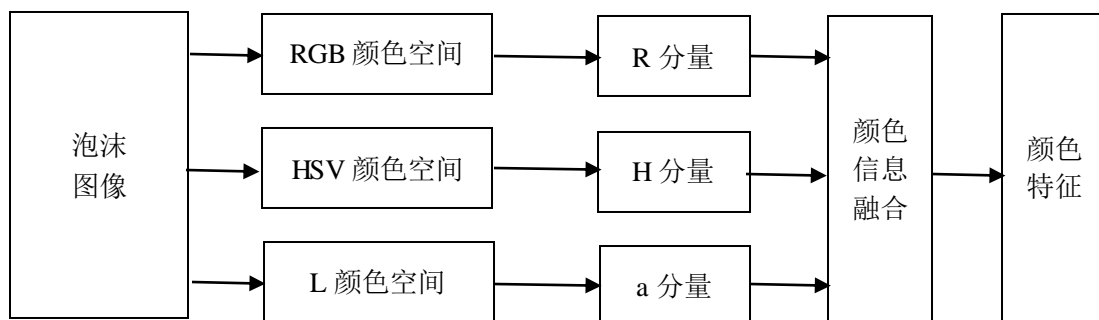


图 4-6 图像颜色融合原理

提取到 R、H、a 分量后，利用证据理论融合这三个分量，其融合流程如图 4-7 所示：

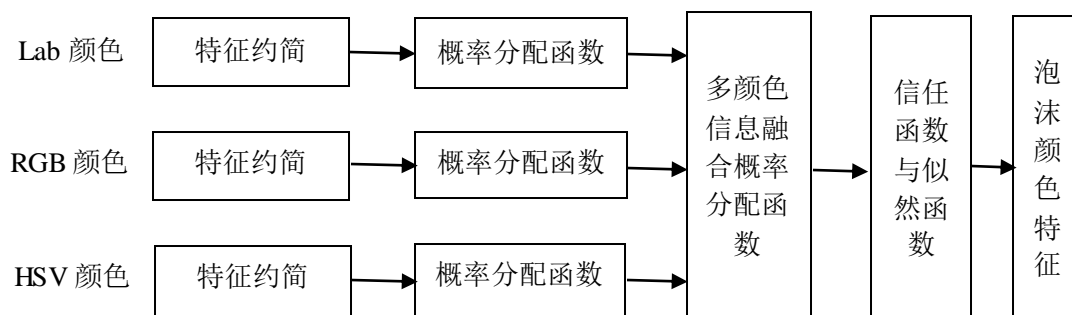


图 4-7 多颜色信息融合方法

基于公式(4-5)(4-6)(4-7)与图 4-6、4-7 的理论知识，写出颜色提取的算法，将其封装在 ClacColor()函数里。

#### 4.3.4 纹理特征提取

纹理包含着某个像素点及该像素周围空间领域灰度分布情况，堆积或细小的泡沫表现出明显的纹理特性，纹理特征可以反应出泡沫表面的粗糙度。纹理特征提取通常采用灰度共生矩阵算法，灰度共生矩阵又包括邻域灰度共生矩阵与空间灰度共生矩阵。本系统采用邻域灰度共生矩阵方法提取纹理特征。

邻域灰度共生矩阵的某个点(k,s)的值 m 的意义是灰度图像中灰度值为 k 的像素的 8 邻域中，灰度值同样也为 k 的个数是 s 的这样的 3\*3 面邻域的个数为 m。邻域灰度共

生矩阵的构建如下：

1. 遍历灰度图像 I 的像素点(i, j)(不包括边缘点), 统计像素点(i, j)的 8-邻域灰度值与点(i, j)灰度值(k)相等的点的个数(s), 并表示为(k, s)。
2. 按照 k 从 0-G(图像灰度级数)与 s 从 0-8 形式统计(k, s)出现的次数(m), 未出现的补 0。
3. 将 m 表示为矩阵 Q(k, s), 即为邻域灰度共生矩阵。

用邻域灰度共生矩阵方法提取的纹理特征参数有细度 F 与粗度 C, F 与 C 的计算如式(4-8)与(4-9)所示。

细度 F :

$$F = \frac{\sum_{k=1}^G \sum_{s=1}^9 [Q(k,s)/s^2]}{\sum_{k=1}^G \sum_{s=1}^9 Q(k,s)} \quad (4-8)$$

粗度 C:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^G \sum_{s=1}^9 [s^2 Q(k,s)]}{\sum_{k=1}^G \sum_{s=1}^9 Q(k,s)} \quad (4-9)$$

由 F 与 C 的表达示可以看出, F 与 C 是成反比关系的, 当每个 8 邻域中与中心点灰度值相同的点越多, 即 s 越大, 则细度 F 越小, 粗度 C 越大, 邻域灰度矩阵重心将越向右边, 此时图像的纹理也越粗糙, 反之亦然。在泡沫浮选过程中, 浮选初期泡沫小, 携带的矿粒多, 泡沫的纹理变化频率高, 导致泡沫纹理较细, 到了浮选后期, 泡沫变大, 其携带的矿粒也减少许多, 纹理自然会变粗<sup>[19]</sup>。通过计算邻域灰度共生矩阵的细度参数与粗度参数, 便可预测浮选工况。纹理特征细度 F 参数计算算法为 **VeinF()** 函数, 对应的粗度 C 的算法为 **VeinC()** 函数, 这两个函数共同调用了邻域灰度共生矩阵生成函数 **VeinQ()**。

#### 4.3.5 速度特征提取

在一般的速度特征提取时, 可以使用基于块跟踪的运动估算方法, 或是块跟踪与自适应 Fourier-Mellin 变换相结合的算法。但是在泡沫浮选过程中, 气泡会发生严重的畸变, 角度与尺寸也会时刻发生变化, 气泡在流动过程中会与其它气泡融合, 有时会破碎,

新的气泡也会产生, 这些原因导致块跟踪算法在提取泡沫速度特征时并不适用。一种基于 SIFT(尺度不变特征转换)与 Kalman 滤波相结合的方法具有旋转不变性、尺度不变性与亮度不变性, 能达到亚像素匹配精度。Kalman 滤波的作用是减少无用 SIFT 特征点, 从而减少 SIFT 特征提取的时间。

### 1. SIFT 算法描述

算法分为以下几个部分。

#### i: 构建尺度空间

高斯卷积核是实现尺度变换的唯一线性核, 于是一副二维图像的尺度空间定义为:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y) \quad (4-10)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (4-11)$$

其中  $G(x, y, \sigma)$  是尺度可变高斯函数,  $I(x, y)$  是原始图像。

为了有效的在尺度空间检测到稳定的关键点, 提出了高斯差分尺度空间 (DOG scale-space), 利用不同尺度的高斯差分核与图像卷积生成。

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \otimes I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (4-12)$$

#### ii: 检测 DOG 尺度空间极值点

为了寻找尺度空间的极值点, 每一个采样点要和它所有的相邻点比较, 看其是否比它的图像域和尺度域的相邻点大或者小。中间的检测点和它同尺度的 8 个相邻点和上下相邻尺度对应的  $9 \times 2$  个点共 26 个点比较, 以确保在尺度空间和二维图像空间都检测到极值点。一个点如果在 DOG 尺度空间本层以及上下两层的 26 个领域中是最大或最小值时, 就认为该点是图像在该尺度下的一个特征点。

#### iii: 除去不好的特征点

本步的目的是去掉 DoG 局部曲率非常不对称的像素, 通过拟和三维二次函数以精确确定关键点的位置和尺度 (达到亚像素精度), 同时去除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点(因为 DoG 算子会产生较强的边缘响应), 以增强匹配稳定性、提高抗噪

声能力，在这里使用近似 Harris Corner 检测器。

#### iv: 主方向的确定

上一步中确定了每幅图中的特征点，为每个特征点计算一个方向，依照这个方向做进一步的计算，利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性为每个关键点指定方向参数，使算子具备旋转不变性。 $(x,y)$ 处特征点的模值和方向为：

$$m(x,y) = \sqrt{((L(x+1,y) - L(x-1,y))^2 + (L(x,y+1) - L(x,y-1))^2} \quad (4-13)$$

$$\theta(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{L(x,y+1)-L(x,y-1)}{L(x+1,y)-L(x-1,y)}\right) \quad (4-15)$$

至此，图像的关键点已经检测完毕，每个关键点有三个信息：位置，所处尺度、方向，由此可以确定一个 SIFT 特征区域。在实际计算时，我们在以关键点为中心的邻域窗口内采样，并用直方图统计邻域像素的梯度方向。梯度直方图的范围是  $0 \sim 360$  度，其中每  $45$  度一个柱，总共  $8$  个柱，或者每  $10$  度一个柱，总共  $36$  个柱<sup>[20]</sup>。Lowe 论文中还提到要使用高斯函数对直方图进行平滑，减少突变的影响。直方图的峰值则代表了该关键点处邻域梯度的主方向，即作为该关键点的方向。

#### v: 关键点描述子的生成

以关键点为中心选取周围  $16 \times 16$  的矩形块，将这  $16 \times 16$  的矩形块分割成  $4 \times 4$  的子矩形块，共  $16$  个，计算每个子块各点的幅值与方向，然后将得到的  $16$  个子块以幅值和高斯函数加权计算在  $0^\circ$ ， $45^\circ$ ， $90^\circ$ ， $135^\circ$ ， $180^\circ$ ， $225^\circ$ ， $270^\circ$ ， $315^\circ$  方向上的直方图，从而得到  $8$  个方向描述符， $16$  个子块共可得到  $128$  个方向描述符，将这个向量归一化之后，就进一步去除了光照的影响。

OpenCV 中有 SIFT 的实现函数，在本系统中使用方法为生成一个 SiftFeature Detector 对象，即 SIFT 特征的探测器，调用此对象的 detect 方法探测图片中 SIFT 点的特征，存到一个 KeyPoint 类型的 vector 中。对图像所有 keypoint 提取其特征向量，进行 SiftDescriptorExtractor 的工作，建立了 SiftDescriptorExtractor 对象后，通过该对象的 compute 方法，对之前 SIFT 产生的特征点进行遍历，找到该特征点所对应的  $128$  维



特征向量, 特征向量被保存到了一个 MAT 的数据结构。使用 BruteForceMatcher 对象的 match 方向进行匹配跟踪。

Kalman 滤波同样在 Opencv 中有可用的函数, 在 OpenCV 中使用 Kalman 的步骤如下:

初始化 Kalman 类的转移矩阵, 测量矩阵, 控制向量, 过程噪声协方差矩阵, 测量噪声协方差矩阵, 后验错误协方差矩阵, 前一状态校正后的值, 当前观察值等变量。然后调用 kalman 这个类的 predict 方法得到状态的预测值矩阵。之后调用 kalman 这个类的 correct 方法得到加入观察值校正后的状态变量值矩阵, 这样又重新获得了这一时刻的校正值, 后面就不断循环步骤二和步骤三即可完成 Kalman 滤波过程。在用 Kalman 处理泡沫图像时, 泡沫子块的中心位置、子块的高度与宽度都作为状态参数。

#### 4.3.6 形状特征提取

在提取泡沫图像中气泡大小特征时, 需要对图像进行区域分割。基于分层分水岭的泡沫图像自适应分割算法可对泡沫图像有很好的分割效果。先介绍分水岭分割算法。

分水岭分割算法如图 4-8 所示:

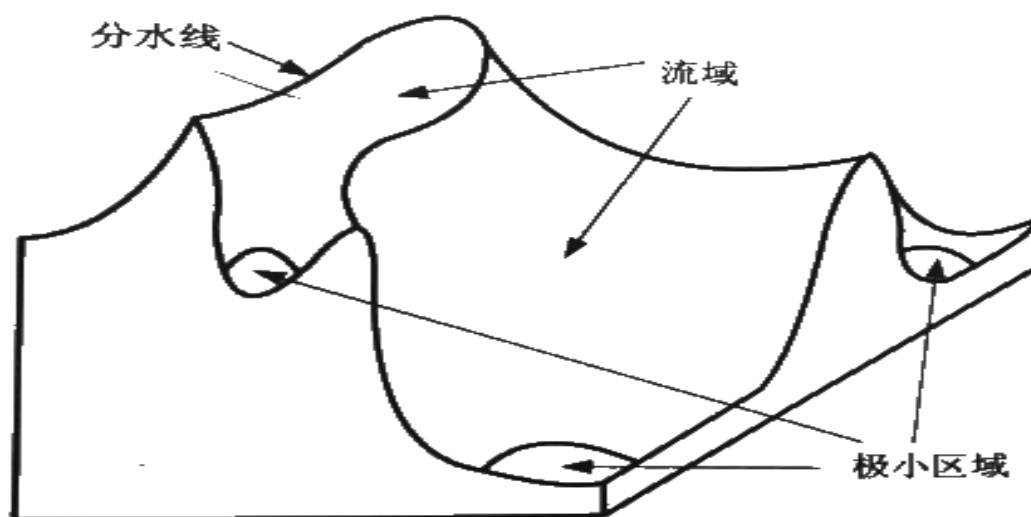


图 4-8 分水岭算法示意图

分水岭计算分两个步骤, 一个是排序过程, 一个是淹没过程。首先对每个像素的灰度级进行从低到高排序, 然后在从低到高实现淹没过程中, 对每一个局部极小值在  $h$  阶

高度的影响域采用先进先出(FIFO)结构进行判断及标注<sup>[21]</sup>。

分层分水岭自适应分割算法流程如图 4-9 所示：

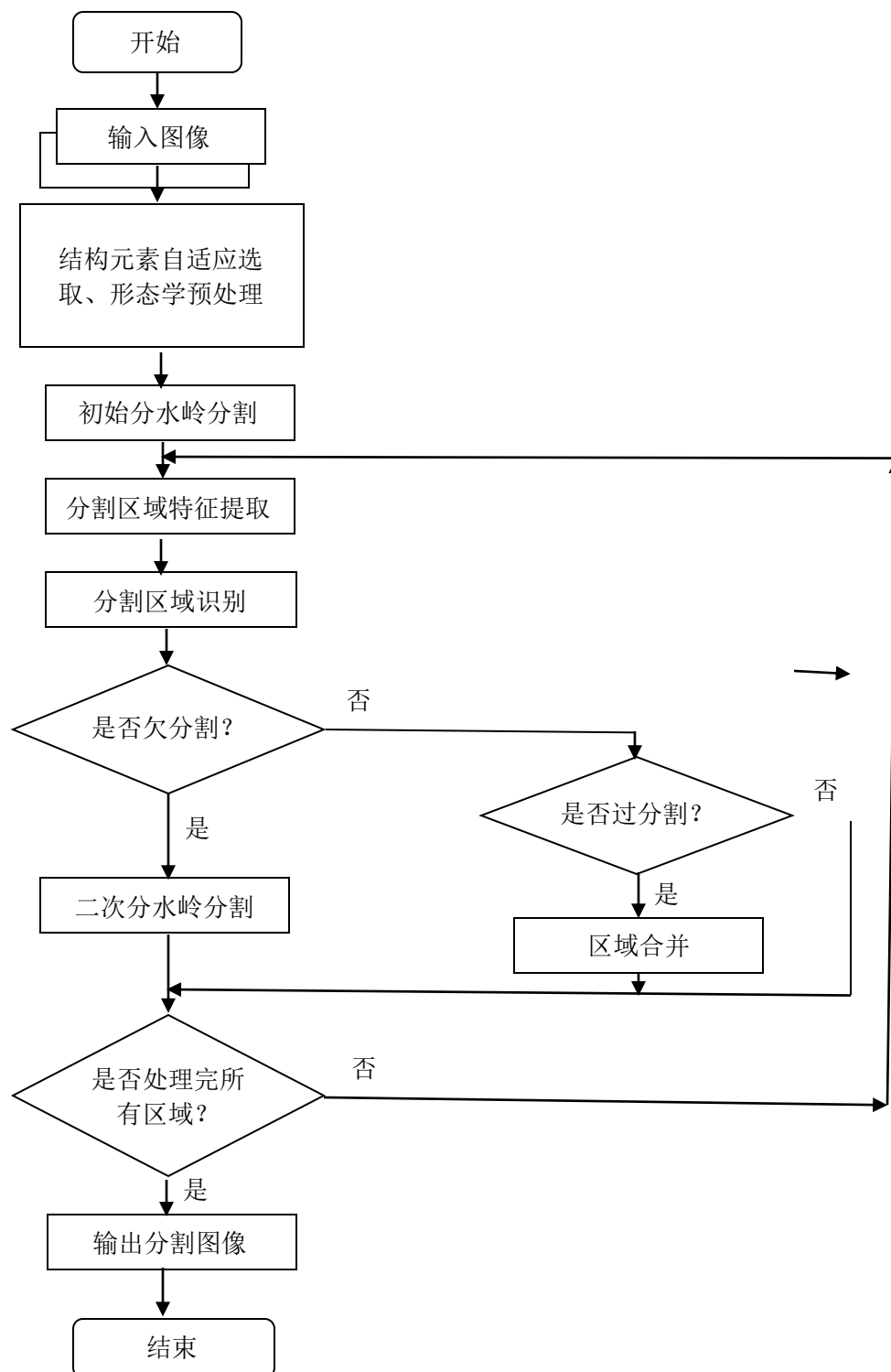


图 4-9 算法流程

OpenCV 中的 `cvWatershed()` 函数是对分水岭算法的封装，在使用 `cvWatershed` 函数



时先使用 `cvFindContour()` 与 `cvDrawContour()` 标记。

#### 4.4 线程池技术的实现

因为在本系统中有大量的图像处理算法，并且系统是连续循环运行，会有大量的动态创建线程，切换，销毁，再创建。这种频繁的销毁再创建线程浪费了大量的系统资源，并会引起内存泄露问题。

基于线程池的多线程技术能够解决以上提出的因大量动态创建线程而导致的浪费系统资源以及引起内存泄露问题<sup>[22]</sup>。线程池技术的原理是线程预创建，在系统运行开始时，便创建  $N$  个线程组成线程队列并全部挂起，然后需要使用线程时通过线程调度函数选择空闲的线程进行工作，线程完成任务后，返回工作线程队列。

在本系统中，数据库操作只允许有一个工作线程，这是为了保证数据库的线程安全。在多线程模块有四个主要的函数，`InitThread()` 函数用来创建线程队列，`CreateThread()` 用来创建单个线程(`AfxBeginThread()` 函数是 MFC 中创建线程的函数，但是它会自己销毁线程，所以这个函数在线程池技术中并不适用)。`DispatchThread()` 函数用来调度线程，可以看成是一个任务接口。`ManageThread()` 函数负责线程队列的管理。基于线程池参数测量流程图如图 4-10 所示。系统中除了参数测量使用到多线程，还有与 OPC 服务器通信模块，浮选视频实时播放模块同样使用到了线程池。

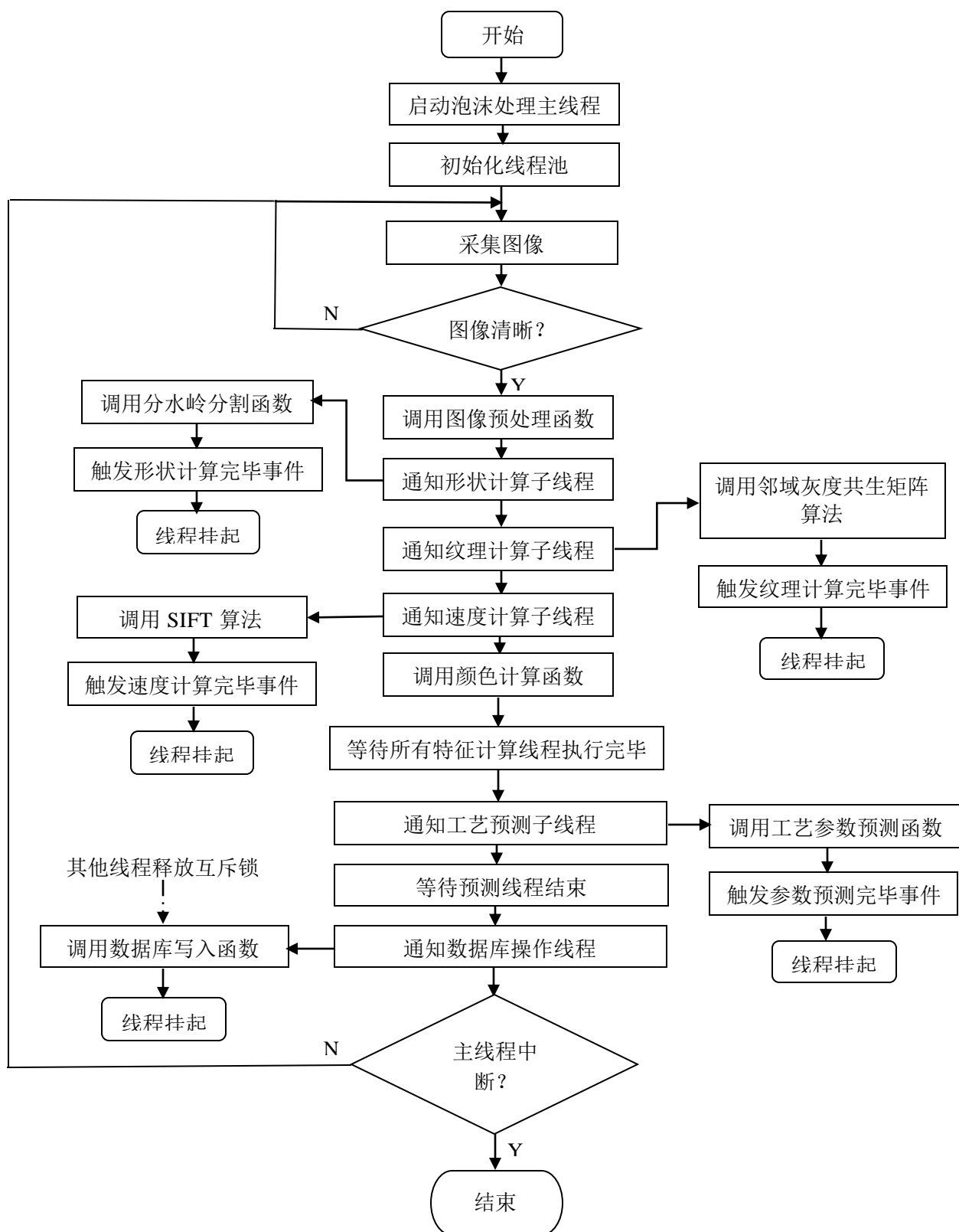


图 4-10 基于线程池技术的泡沫参数测量流程图

## 4.5 数据库的设计与实现

数据库是非常复杂的软件，编写程序通过某种数据库专用接口与其通信是非常复杂的工作，为此，产生了数据库的客户访问技术，即数据库访问技术。数据库访问技术将数据库外部与其通信的过程抽象化，通过提供访问接口，简化了客户端访问数据库的过程。目前 Windows 系统上常见的数据库接口包括：ODBC(开放数据库互连)、MFC(Microsoft 基础类) ODBC 类、DAO(数据访问对象) RDO(远程数据对象)、OLEDB(对象链接嵌入数据库)、ADO(ActiveX 数据对象)<sup>[23]</sup>。

ADO 便于使用，支持任何的 OLEDB 服务器，还可以操作任何的 OLEDB 数据源。不损失任何 OLEDB 的功能，ADO 支持 C++编程人员操作底层的 OLEDB 接口。可扩展性强，ADO 能够通过提供者属性集合动态地表示指定的数据提供者，还能够支持 COM 的扩展数据类型。因此使用 ADO 的数据库访问技术来实现数据库模块。

通常情况下，一个基于 ADO 的数据库应用使用如下过程操作数据源里的数据：

(1) 创建一个 Connection 对象。定义用于连接的字符串信息，包括数据源名称、用户 ID、口令、连接超时、缺省数据库以及光标的位置。一个 Connection 对象代表了同数据源的一次会话。可以通过 Connection 对象控制事务，即执行 BeginTrans、CommitTrans 和 RollbackTrans 方法。

(2) 打开数据源，建立同数据源的连接。

(3) 执行一个 SQL 命令。一旦连接成功，就可以运行查询了。可以以异步方式运行查询，也可以异步地处理查询结果，ADO 会通知提供者后台提供数据。这样可以让应用程序继续处理其它事情而不必等待。

(4) 使用结果集。完成了查询以后，结果集就可以被应用程序使用了。在不同的光标类型下，可以在客户端或者服务器端浏览和修改行数据。

(5) 终止连接。当完成了所有数据操作后，可以销毁这个同数据源的连接。

本系统使用 mysql 数据库，数据库中每一个浮选槽对应有一张表 featureinfo(n)，记

录特征值与浮选工况(其中 n 表示第 n 个槽), 如图 4-11 所示:

字段名	类型	长度	描述
time	datetime	6	时间
foamSize	float	10	泡沫大小
sizeVariance	float	10	尺寸方差
foamSpeed	float	10	泡沫速度
roughness	float	10	粗度 C
exquisiteness	float	10	细度 F
colorMean	float	10	颜色均值
brightness	float	10	亮度
flotEffect	varchar	10	浮选效果
workConditions	varchar	10	工况

图 4-11 特征值与工况数据表

数据库中每一个浮选槽还对应有一张金粗选加药优化指导表 goldddosinginfo 与一张锑粗选加药优化指导表 antimonydosinginfo, 如图 4-12 与 4-13 所示:

字段名	类型	长度	描述
sodiumcarbonateRT	float	10	碳酸钠实时值
sodiumcarbonateSU	float	10	碳酸钠建议值
coppersulfateRT	float	10	硫酸铜实时值
coppersulfateSU	float	10	硫酸铜建议值
sodiumsilicateRT	float	10	水玻璃实时值
sodiumsilicateSU	float	10	水玻璃建议值
xanthateRT	float	10	黄药实时值

xanthateSU	float	10	黄药预测值
sodiumsulfideRT	float	10	硫化钠实时值
sodiumsulfideSU	float	10	硫化钠预测值

图 4-12 金粗选加药指导表

字段名	类型	长度	描述
coppersulfateRT	float	10	硫酸铜实时值
coppersulfateSU	float	10	硫酸铜建议值
AerofloatRT	float	10	黑药实时值
AerofloatSU	float	10	黑药建议值
xanthateRT	float	10	黄药实时值
xanthateSU	float	10	黄药预测值
leadnitrateRT	float	10	硝酸铅实时值
leadnitrateRT	float	10	硝酸铅预测值

图 4-13 锑粗选加药指导表

数据库里还有一张保存用户名与密码的表 `userinfo`，字段为 `username` 与 `userpwd`。

在 MFC 中使用 ADO 前必须在工程的 `stdafx.h` 头文件里用直接引入符号 `#import` 引入 ADO 库文件,以使编译器能正确编译然后初始化 OLE/COM 库环境 必须注意的是，ADO 库是一组 COM 动态库，这意味应用程序在调用 ADO 前，必须初始化 OLE/COM 库环境，初始化 OLE/COM 需要使用函数 `AfxOleInit()`。

ADO 库包含三个基本接口：`_ConnectionPtr` 接口、`_CommandPtr` 接口和 `_RecordsetPtr` 接口。

`_ConnectionPtr` 接口返回一个记录集或一个空指针。通常使用它来创建一个数据连接或执行一条不返回任何结果的 SQL 语句，如一个存储过程。

\_CommandPtr 接口返回一个记录集。它提供了一种简单的方法来执行返回记录集的存储过程和 SQL 语句

\_RecordsetPtr 是一个记录集对象。与以上两种对象相比，它对记录集提供了更多的控制功能，如记录锁定，游标控制等。

MFC 中的 CString 类和 COM 对象是不兼容的，需要一组 API 来转换 COM 对象和 C++ 类型的数据，在数据库编程中常用 \_variant\_t 和 \_bstr\_t 这两种对象提供的方法转换 COM 对象和 C++ 类型的数据。

#### 4.6 专家系统的实现

专家系统的实现是基于数据库技术，将专家规则写入数据表中，跟据当前浮选图像特征查询专家规则表，获取浮选控制策略。粗选槽的专家知识数据表名为 expertsrulef，表如图 4-14 所示：

字段名	类型	长度	描述
foamSizeH	float	10	泡沫大小上限值
foamSizeL	float	10	泡沫大小下限值
sizeVarianceH	float	10	尺寸方差上限值
sizeVarianceL	float	10	尺寸方差下限值
foamSpeedH	float	10	泡沫速度上限值
foamSpeedL	float	10	泡沫速度下限值
roughnessH	float	10	粗度 C 上限值
roughnessL	float	10	粗度 C 下限值
exquisitenessH	float	10	细度 F 上限值
exquisitenessL	float	10	细度 F 下限值
colorMeanH	float	10	颜色均值上限值

colorMeanL	float	10	颜色均值下限值
brightnessH	float	10	亮度上限值
brightnessL	float	10	亮度下限值
comment	varchar	50	泡沫综合评价
suggestion	varchar	50	专家建议
expertname	varchar	10	专家姓名

图 4-14 专家知识数据表

专家系统实现的接口函数是 `expertsRulesQuery()`，函数中实现了查询专家知识表获取加药指导与泡沫评价，并将泡沫综合评价与专家建议写入到专家知识表的 `comment` 与 `suggestion` 字段中。同时更新数据库中的金粗选加药优化指导表 `golddosinginfo` 与锑粗选加药优化指导表 `antimonydosinginfo`。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 工作总结

从拿到这个毕业设计题目开始，经过三个多月的努力，基本完成了泡沫浮选过程集中监视系统的设计。实现了系统以下几个功能：

- (1) 远程监控视频的播放，操作人员可以方便的远程观察浮选状态。
- (2) 与工业现场 OPC 服务器通信，以获取现场的某些实时数据。
- (3) 泡沫图像特征提取与显示以及特征曲线图的显示，可以让操作人员更清晰的了解浮选状况。
- (4) 数据入库，方便以后查询与分析历史浮选状况。
- (5) 专家系统的搭建，让系统拥有了专家级的浮选控制经验，减少因工人员经验不足而导致的误操作。
- (6) 异常报警功能，在工况异常时，自动检测并报警，减少了人力消耗。

三个月的毕业设计所做的工作总结如下：

- (1) 通过查阅国内外文献，充分了解了基于泡沫浮选图像处理的过程监视技术的发展与现状。
- (2) 查阅书籍，掌握泡沫浮选的工艺流程。
- (3) 对 MFC 进行加强学习，掌握 MFC 框架设计、界面扁平化设计、线程池实现、数据库操作、曲线动态绘制等编程技术。
- (4) 重点对泡沫图像处理技术进行了研究，并引入最先进的机器视觉库-OpenCV，使得对泡沫图像的处理更加容易，同时图像处理速率与效果都得到了提升

### 5.2 后期工作展望



虽然经过三个月的努力，基本实现了监控系统的设计，但是由于个人能力以及时间有限，系统中仍然有许多不足与暗含的漏洞，后期仍然会对此系统进行进一步的修改与优化，系统仍需要后期改进的地方说明如下：

(1) 由于泡沫图像中气泡顶点会因全反射的存在而出现亮点，掩盖了图像颜色，这样会对颜色特征提取影响很大，因此在图像预处理时，需要对图像进行去除顶部亮点处理。

(2) 基于邻域灰度共生矩阵的纹理提取算法应用在彩色的泡沫图像上会丢失很多色彩信息，并且此方法比较消耗时间，因此需要研究基于彩色图像的纹理提取算法，并优化其算法时间复杂度。

(3) 本系统还应该对浮选槽内的 PH 值进行软测量，需要研究基于 RBF 神经网络的 PH 值软测量技术。

(4) 系统在运行时出现过闪退的现象，因这种现象很少发生，但又必须解决，所以需要到现场试验并仔细调试。

(5) 本系统的专家系统是最简单的专家系统，下一步需要研究更加复杂的专家系统以适应复杂的浮选工艺。

## 致 谢

时间如白驹过隙，转瞬即逝，四年，时光已悄悄然聚焦于大学之尾，一路走来，或是精神上的鼓励，或是时光上的陪伴，抑或是技术上的支持，四年光阴，有太多的人需要用心来感谢。

本课题指导老师为桂卫华与谢永芳教授，在他们繁忙的科研同时，还抽出时间悉心指导我的毕业设计，在此衷心的感谢桂老师与谢老师对我的关心与指导。

其次感谢尉思谜学姐在技术上的大力支持，感谢 132 实验室同学们的鼓励与陪伴，没有他们的陪伴与支持，我也不能怀着一颗愉悦的心情顺利的完成毕业设计。

最后感谢母校——中南大学提供的良好的学习与四年来的大力栽培。

## 参考文献

- [1] 陈思超. 浮选气泡在矿浆中运动的数值模拟研究[D]. 中南大学, 2013, 69.
- [2] Moolman D W, Aldrich C, Van Deventer J S J. The interpretation of flotation froth surfaces by using digital image analysis and neural networks. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(22):3501-3513.
- [3] 程翠兰. 基于颜色与纹理特征的矿物浮选精选泡沫分类[D]. 中南大学, 2010, 62.
- [4] Lin B, Recke B, Knudsen J K H. et al. Bubble size estimation for flotation process[J]. *Minerals Engineering*, 2008, 21(7):539-548.
- [5] Yang CH H, Mu X M, et al. Bubble size estimation using interfacial morphological information for mineral flotation process monitoring[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(3):694-699.
- [6] 平翠霞. 铝土矿浮选泡沫尺寸分布特征与浮选药剂添加量关系模型[D]. 中南大学, 2012, 69.
- [7] Bonifazi G, Serranti S, Volpe F, et al. Characterization of flotation froth colour and structure by machine vision[J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27(9):1111-1117.
- [8] Tsatouhas G, Grano S t, Vera M. Case studies on the performance and characterization of the froth phase in industrial flotation circuits[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(6/8):774-783.
- [9] Neethling S J, Gilliers J J. Modellong flotation froths[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 72(1/4):267-287.
- [10] 孟丽娟. 铜浮选精选泡沫图像分割无监督评价方法的研究[D]. 中南大学, 2012, 72.
- [11] 牟学民. 矿物浮选泡沫图像序列动态特征提取及工业应用[D]. 中南大学, 2012, 151.
- [12] 陈文伟. 决策支持系统及其开发[M]. 清华大学出版社, 2000.
- [13] 李琳. VC++ 中模态对话框和非模态对话框的编程[J]. *电脑编程技巧与维护*, 2006 (3): 33-35.
- [14] 季胜鹏, 林中达. 基于 OPC 规范的客户/服务器模型设计[J]. *电力自动化设备*, 2002, 22(11): 59-62.
- [15] 钱永青. 基于 kalman 预测目标跟踪的人机接口[D]. 中南民族大学, 2010, 53.
- [16] 李建奇. 矿物浮选泡沫图像增强与分割方法研究及应用[D]. 中南大学, 2013, 139.
- [17] 李峰. 数字图像质量检测技术的研究与实现 [D][D]. 江苏大学, 2005, 60.
- [18] 夏日诚. 基于彩色和灰度图像的色图设计[D]. 电子科技大学, 2007.
- [19] 刘文礼, 陈子彤. 煤泥浮选泡沫的数字图像处理[J]. *燃料化学学报*, 2002, 30(3): 198-203.
- [20] 阎冲. 基于 SIFT 算法的目标特征检测与提取技术研究[J]. *传感器世界*, 2012, 18(9): 22-26.
- [21] 陈林林, 杨晨, 李敏娟, 等. 基于形态学梯度重建的分水岭算法改进研究[J]. *中国印刷与包装研究*, 2013 (4): 112-118.
- [22] 桂卫华, 阳春华, 谢永芳, 唐朝晖. 矿物浮选泡沫图像处理与过程监测技术[M]. 中南大学出版社, 2013, 227-228.
- [23] 颜昌彬. 基于 VC 和 SQL Server 的实验数据库系统研究 [D][D]. 武汉理工大学自动化学院, 2006, 55.

## 附 录

图 1 系统登录界面

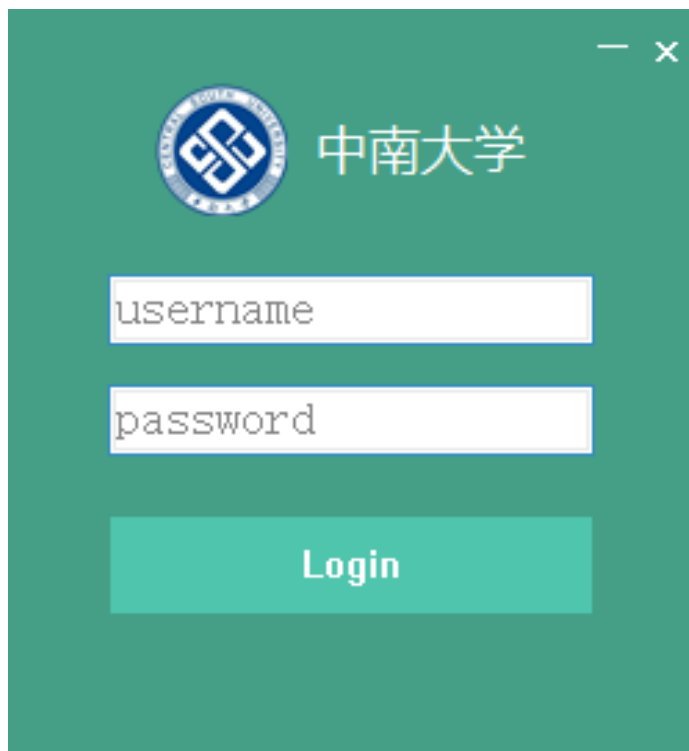


图 2 系统工艺流程图界面

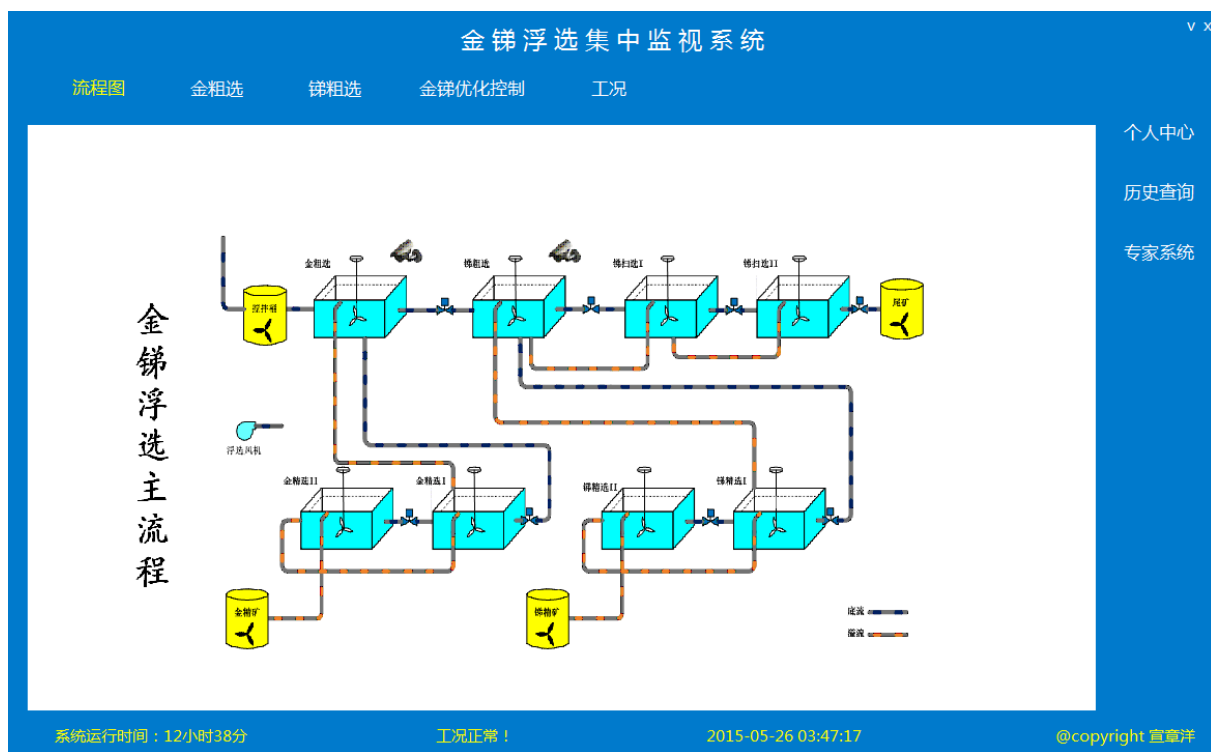


图 3 金粗选界面

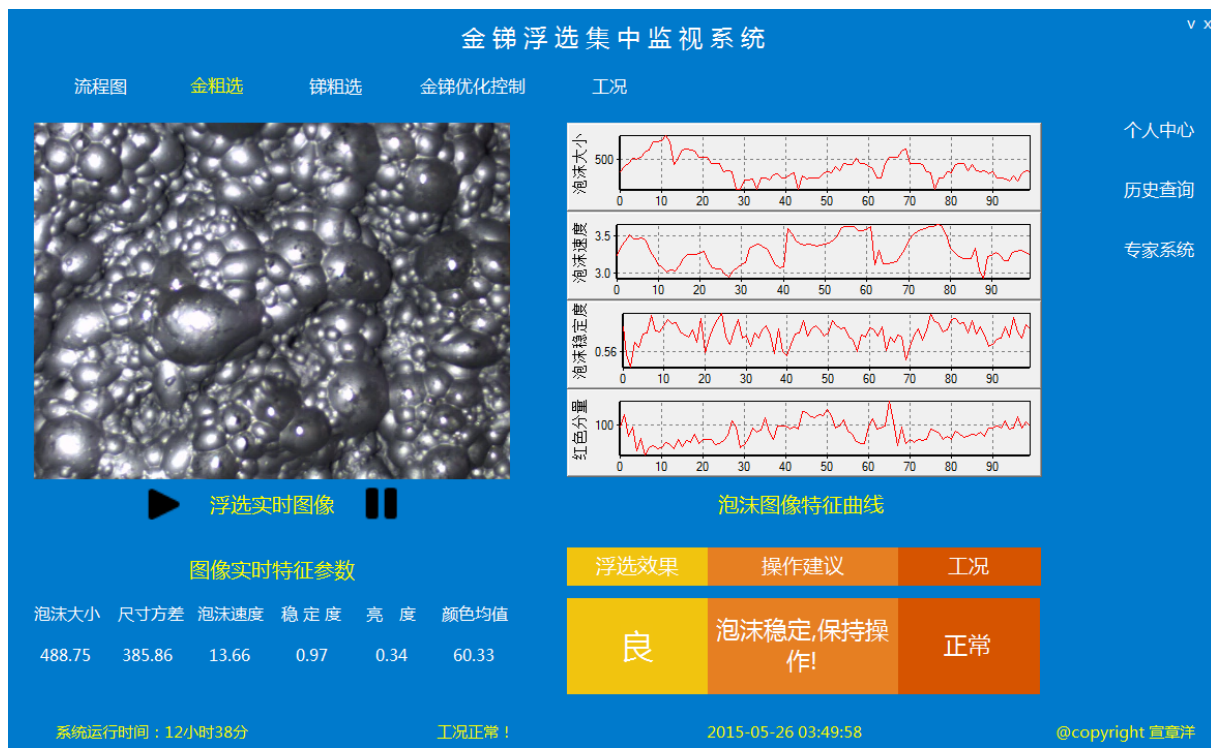


图 4 锑粗选界面

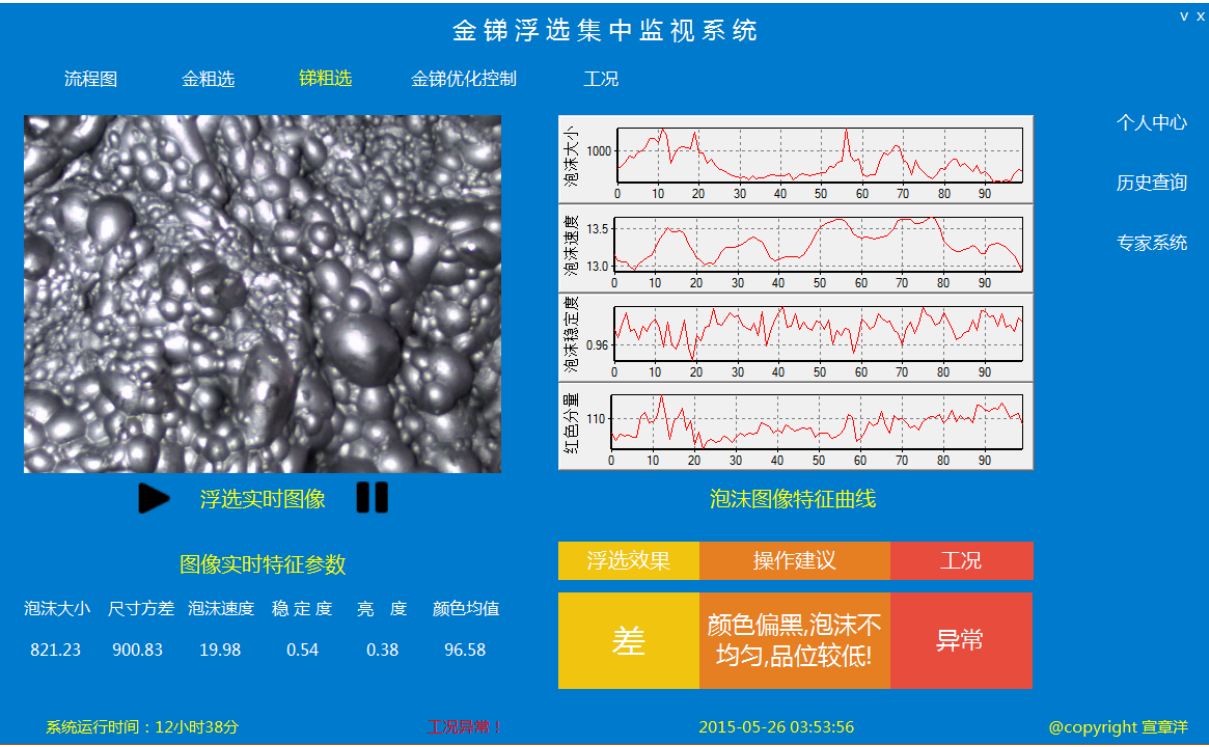


图 5 金锑优化控制界面





图 6 监控视频实时播放界面

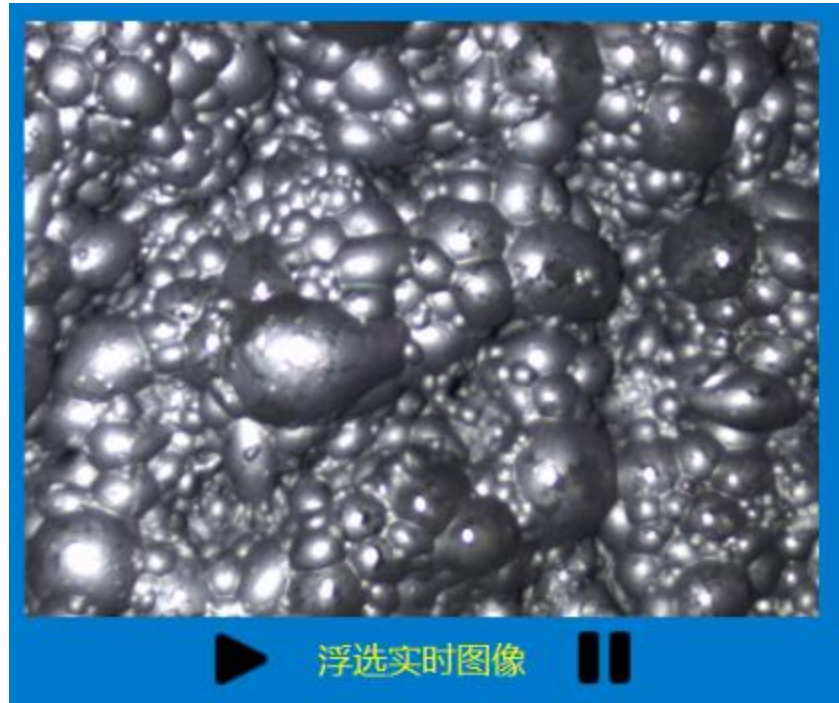


图 7 特征曲线显示界面

