****

本科毕业设计(调研)

GRADUATION DESIGN(RESEASH)

|  |  |
| --- | --- |
| 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4月

**金锑浮选过程集中监视系统开发**

摘要

泡沫浮选是应用最为广泛的一种选矿方法，几乎所有矿石都可以用泡沫浮选分选，由于浮选工艺流程长、内部机理不明确、影响因素多、涉及变量多且非线性严重、工艺指标不能在线检测等原因，一直以来，浮选过程主要依靠人工肉眼观察浮选槽表面泡沫状态来完成现场操作，这种以人工肉眼观察泡沫进行浮选操作的生产方式主观性强，难以实现浮选泡沫状态的客观评价与认知，造成浮选生产指标波动频繁、矿物原料流失严重、药剂消耗量大、资源回收率低等情况发生。而工业视觉检测速度快，金锑浮选过程集中监视系统意义便是在于实时监视金锑浮选过程泡沫图像的特征、关键工艺参数和浮选工况，为稳定浮选生产工况，提高精矿品位和回收率发挥了重要作用。金锑浮选过程集中监视系统开发包括以下几个技术要点：泡沫浮选、图像处理与机器视觉、VC++软件设计。本文将首先介绍浮选过程集中监视系统的重要意义以及发展现状，然后介绍用于浮选过程泡沫图像特征提取的现代图像处理与机器视觉方法，最后将介绍基于线程池的实时监控系统的VC实现技术。

**关键词：**监控系统 泡沫浮选 图像处理与机器视觉 软件设计

**Gold-Antimony flotation centralized monitoring system development**

**ABSTRACT**

Froth flotation is the most widely used method of ore dressing，and almost all the ore can be used froth flotation to separation. Due to so long flotation process, not clear internal mechanism , too many influencing factors, involving many variables and severe nonlinear ,cannot test process indicators online and other reasons, the flotation process mainly depends on artificial visual observation of flotation cell surface froth state to complete on-site operation. This kind of manual observation froth flotation operation mode of production is strong subjective, it is difficult to achieve an objective assessment  and cognition of the state of froth and cognition, causing frequent fluctuations of flotation production index, a serious loss of mineral raw materials, a large consumption of pharmaceutical, low resource recovery happening, But industrial visual have a height inspection speed. Gold-antimony flotation centralized monitoring system significance lies real-time monitoring of Gold - antimony flotation froth image characteristics, critical process parameters and the flotation conditions, it plays an important role in steadying flotation condition, improving concentrate grade and recovery. Gold-antimony flotation centralized monitoring system development process consists of the following technical points: Froth flotation, Image processing and machine vision, VC ++ Software Design. This article will first introduce the importance and development status of flotation process centralized monitoring system, and then introduces the modern image processing and machine vision methods of flotation froth image feature extraction process, and finally introduce real-time monitoring system based on VC thread pool technology..

**Key words：**Froth Flotation Machine Vision VC ++ Software Design

目录

[第一章 绪论 4](#_Toc418343574)

[1.1 浮选过程集中监视系统的重要意义 4](#_Toc418343575)

[1.2 国内外研究现状与发展前景 2](#_Toc418343576)

[第二章 浮选过程工艺 5](#_Toc418343577)

[2.1 浮选生产过程原理与工艺 5](#_Toc418343578)

[2.2 浮选泡沫特征的主要影响因素 5](#_Toc418343579)

[2.3 表征浮选工况的泡沫表面视觉特征 5](#_Toc418343580)

[第三章 金锑浮选过程集中监控系统总体设计 5](#_Toc418343581)

[3.1 系统需求分析 5](#_Toc418343582)

[3.2 系统总体设计 5](#_Toc418343583)

[3.3 系统模块组成 7](#_Toc418343584)

[3.3.1 前台界面模块 7](#_Toc418343585)

[3.3.2 与OPC服务器通信模块 7](#_Toc418343586)

[3.3.3 图像处理模块 7](#_Toc418343587)

[3.3.4 数据库模块 7](#_Toc418343588)

[3.3.5 专家系统模块 7](#_Toc418343589)

[第四章 金锑浮选过程集中监控系统的实现 7](#_Toc418343590)

[4.1 系统界面的实现 7](#_Toc418343591)

[4.1.1 登录界面设计 8](#_Toc418343592)

[4.1.2 主界面设计 8](#_Toc418343593)

[4.1.3 监控视频实时显示的实现 8](#_Toc418343594)

[4.1.4特征曲线图的实现 8](#_Toc418343595)

[4.2 系统与OPC服务器通信的实现 8](#_Toc418343596)

[4.3 系统浮选图像处理模块的实现 9](#_Toc418343597)

[4.3.1 图像预处理 9](#_Toc418343598)

[4.3.2颜色特征提取 10](#_Toc418343599)

[4.3.3速度特征提取 13](#_Toc418343600)

[4.3.4形状特征提取 14](#_Toc418343601)

[4.3.5纹理特征提取 15](#_Toc418343602)

[4.4 线程池技术的实现 16](#_Toc418343603)

[4.5 数据库的设计与实现 16](#_Toc418343604)

[4.5.1 数据流模型图 16](#_Toc418343605)

[4.5.2 图像分析数据表 17](#_Toc418343606)

[4.6 专家系统的实现 17](#_Toc418343607)

[第五章 总结 19](#_Toc418343608)

[参考文献 20](#_Toc418343609)

# 第一章 绪论

1.1 浮选过程集中监视系统的重要意义

矿产资源绝大多数都是蕴藏在矿右中，需要经过选矿加工提纯后才可使用，泡沫浮选是最常使用选矿方法，它是根据矿物颗粒物化性质不同来分选矿物的分离方法，可用在几乎所有的矿石分选中。

泡沫浮选的工艺流程长，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，研究基于机器视觉的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。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。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R，G，B值的平均值与标准差得到浮选泡沫的颜色特征，通过分水岭算法提取了泡沫的尺寸特征，计算汽泡区域的全反射点占图像面积的百分比提取到承载率特征，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图像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

精矿（水）

磨矿

泡沫层

矿化起泡作用

浮选药剂

矿化气泡浮升

分散成气泡

浮选槽

空气

尾矿（水）

水

搅拌槽

矿石

矿粒悬浮

药剂作用

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。按照浮选工艺，浮选流程可分为不同步骤。

经破碎后的矿石

磨矿-分级

加药搅拌

（药剂作用）

气泡矿化

刮泡

泡沫精品

非泡沫产品

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。泡沫的稳定性，气泡的大小，形状和数量都会影响浮选工况。所以在浮选过程中得到良好的泡沫结构与外观特征是非常关键的。可以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。浮选药剂按作用可分为三类：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降低了水在气泡中的蒸发速度。调整剂的作用是调节浮选槽中的PH值。矿浆的PH是影响浮选效果的重要因素，表面活化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，应避免过粉碎和泥化现象。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，影响产能。将风压控制在适当的范围内能够提高泡沫的稳定性与泡沫的大小。

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视觉特征来判断浮选的工况，现场采集的泡沫图像噪声大，灰度值偏低，并有大量的阴影和气泡亮点，需要对图像进行预处理。

浮选泡沫视觉特征参数众多，常用的特征分为形态特征，颜色纹理特征，动态特征三大类。

(1)形态特征

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，中等尺寸的均匀椭圆气泡会带有较多矿物，通过观察气泡尺寸的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。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，导致其颜色表面颜色不同。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，也即可以判断浮选的状态。

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泡沫层矿物粒子碰撞的时间，从而影响了泡沫携带矿粒的多少，这极大的影响浮选的效率与精矿品位。不仅如此，泡沫流速还影响矿物的回收率。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底层矿浆，造成资源浪费。监测泡沫的流速与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。

监控视频播放

单槽视频

暂停、继续

实时图像

特征值显示

实时工艺

预测值显示

实时

趋势图显示

控制策略显示

工况异常报警

历史

趋势图显示

专家

规则库界面

图像分析库

专家知识库

图像特征提取

图像采集

图像预处理

工艺参数预测

前台界面

后台处理

数据库

图3-1 软件总体结构图

图像分析库

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. 第四个子对话框跟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。并有专家规则库的添加，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。

图像特征自动入库

工况记录自动入库

泡沫大小

尺寸方差

泡沫速度

稳定度

亮度

颜色均值

实时特征曲线动态显示

历史特征曲线动态显示

金/锑粗选槽实时监控视频显示

金/锑粗选槽图像特征参数显示

金/锑浮选图像特征曲线显示

浮选效果，操作建议与工况显示

控制策略显示

专家规则添加与修改

开始

登录系统

初始化主对话框面板

创建多个子对话框面板

创建多个按钮

金锑浮选工艺流程图子面板

金粗选子面板

锑粗选子面板

专家控制策略子面板

工况显示及报警子面板

图 3-2 软件流程图

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。

3.3.1 登录模块

登录模块从系统数据库中读取用户名与密码与用户输入的用户名与密码进行对比，相同则登录成功，进入系统主界面。

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 与OPC服务器通信模块

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，利用人工智能与计算机技术，跟据专家规则库模拟人类专家决策的过程，加入了专家规则的系统能够解决需要人类专家处理的复杂问题。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1-1。

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()中的最开始处，并以模态对话框的方式创建(对话框的分为模态与非模态对话框，模态对话框是阻塞型的，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)，因此只有当登录对话框退出才能继续初始化化系统主界面。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语句实现如果鼠标在窗口客户区，则返回标题条代号给Windows使Windows按鼠标在标题条上进行处理，即可单击移动窗口。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，他们都是利用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1-2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。系统已运行时间是用当前时间减去系统登录时间并实时显示。

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1-3，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1-4和1-5，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\_OPTIMIZECTRDLG，界面见附录1-6该子对话框包含专家系统的建立，操作建议的显示，专家规则的添加、修改与删除。最后一个子对话框是实现工况显示与工况异常报警显示，界面见1-7，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1-8。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CvvImage类的DrawToHDC()方法，但是CvvImage类在opencv2中不再使用，需要单独将CvvImage.h与CvvImage.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CvvImage类的CopyOf()函数将IplImage型的图片转换为CvvImage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

由于矿物种类和原矿品位的不同，入磨后矿粒的粗细度不一样，矿物在浮选

阶段所表现出来的泡沫表面物理特征有很大区别。现场调研分析发现，轻金属矿

物浮选由于其颗粒较细、重量轻，产生的气泡非常小，气泡呈絮状，使得浮选槽

表面累积了众多小气泡，气泡与气泡之间相互粘合、叠加，形成矿物的堆积层并且易破裂。重金属和煤泥浮的选泡沫物理特性比较明显，产生的泡沫往往都比较大，多呈圆形，也不易发生泡沫堆积现象。轻金属的浮选泡沫图像与重金属和煤泥的浮选泡沫图像如图3-1所示。

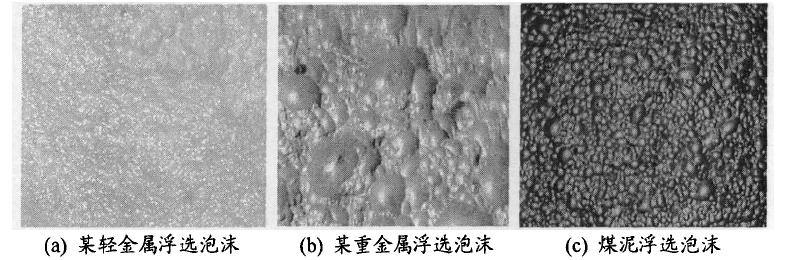


图3-1 不同矿物的浮选泡沫

4.2 系统与OPC服务器通信的实现

浮选生产中，表面泡沫层与浮选技术指标有着重要联系[[32]，基于泡沫图像的浮选过程监控系统能否成功地实现工艺指标预测目标，前提就是要正确地选择泡沫图像的特征变量，保证所选择的特征能正确地反映出浮选状态。下面对影响工艺指标的泡沫图像特征进行机理分析。

(1)泡沫颜色

泡沫颜色是泡沫层的重要特征，它反映了原矿种类和气泡含矿量。原矿种类决定泡沫的颜色，例如在自然状态下，钨矿呈白色，铝土矿呈红褐色，铁闪锌呈黑褐色;泡沫含矿量影响泡沫颜色的深浅，例如泡沫层铝土矿含量高时，泡沫呈红褐色，反之泡沫呈灰褐色。在浮选现场中，操作工人观察泡沫层颜色的深浅，来判断泡沫含矿量的多少。

(2)泡沫形状

泡沫的形状特征指的是泡沫的面积、数据及其大小分布。泡沫形状常随浮选

矿物的性质、粒度以及浮选药剂制度而变，它对浮选结果有直接影响。泡沫靠表面积负载矿粒，当充气量一定时，若泡沫的直径过大，将减小泡沫的总表面积，不利于有用矿粒的碰撞及附着，回收的有用矿物将会减少;而如果泡沫太小，表面承载的矿粒过多，使矿化泡沫的平均密度大于矿浆密度，它就浮不上来，甚至无法达到浮选要求，也不利于提高有用矿物的回收率。因此，气泡应有一定的直径组成，并有大小不同、比例合适的气泡，使矿粒的承载量最多。在浮选过程中，工人通过调节风压和药剂添加量，来控制泡沫的大小分布。

(3)泡沫运动速度

浮选机的叶轮搅拌速率控制着气泡充气量。叶轮不断转动，推动矿浆向前流动，矿浆速度受叶轮转动速率控制。在叶轮速率相同的情况下，不同类型的叶轮机对泡沫大小分布的影响是不一样的，可能气泡较小较密，也可能泡沫较大较疏。但是当叶轮速率提高时，无论针对任何叶轮机，气泡大小都会显著升高。其根本原因在于叶轮速率的提高使得气流量增加，从而导致气泡大小的升高。由于泡沫大小是反映工艺参数的关键指标之一，因此提取泡沫运动速度对于提高矿物品位的预测精度有着重要意义。

(4)泡沫纹理

泡沫的纹理是泡沫表面粗糙度、对比度和戮性的综合表述。粗糙度和对比度

与泡沫表面矿物的富集程度有关，而泡沫的勃性与泡沫含水量有关，因此，泡沫

的纹理特征与矿物品位密切相关。在泡沫较小，无法准确分割泡沫图像时，采用泡沫纹理特征表征泡沫状况有着重要意义。

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，它为图像处理，模式识别，三维重建，物体跟踪，机器学习和线性代数提供了各种各样的算法。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，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，一般是对图像进行筛选，再降噪和光照补偿。

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。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wa=0.4，wb=0.3，wc=0.3。下面介绍这三个函数

1. TenenGrad函数。模糊度定义为：

(4-1)

其中:

，

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

1. 平方梯度函数。模糊度定义为：

(4-2)

1. 自适应加窗梯度函数。加窗示意图如图4-1所示，

A

C

O

B

D

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：

(4-3)

(4-4)

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

点(x,y)的灰度值，w1和w2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，开运算可以用来消除小物体、在纤细点处分离物体、平滑较大物体的边界的同时并不明显改变其面积。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。通过形态学和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动算，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。

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\*7矩形范围内的平均像素值，若相当点像素值与7\*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Log[R(x,y)]= Log[R(x,y)] + w\*(Log[Ii(x,y)]-Log[Li(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。

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CIE的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。一般图像采集设备使用的是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表示颜色的深浅，Value表示颜色的明暗程度。HSV颜色空间与RGB颜色空间的转化关系如式(4-5)所示：

(4-5)

1. 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，L的范围是0-100，表示从黑到白，+a为红色，-a为绿色，+b为黄色，-b为蓝色。从RGB到Lab空间的转换如式(4-6)所示：

(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：

(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：

泡沫

图像

RGB颜色空间

HSV颜色空间

L颜色空间

R分量

H分量

a分量

颜色信息融合

颜色特征

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：

Lab颜色

RGB颜色

HSV颜色

泡沫颜色特征

特征约简

特征约简

特征约简

概率分配函数

概率分配函数

概率分配函数

多颜色信息融合概率分配函数

信任函数与似然函数

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，写出颜色提取的算法封装在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：

4.3.5速度特征提取

像素跟踪是常用的速度特征提取方法，计算简便，从算法的时间复杂度上考虑，比较适于计算机处理与软件的实时显示。然而，这种方法对视频采集设备的图像采集速率要求较高，连续两帧图像的时间间隔要足够小(一般不超过30毫秒)。常规的像素跟踪方法鲁棒性差，无法适用于运动中的泡沫跟踪。

本文采用宏块跟踪方法求取泡沫的运动速度。宏块跟踪示意图如图3-4所示。可以认为，图像中的每个子块运动前后是相互独立的。事实上，在一个足够短的时间间隔内(如连续两帧图像的采集时间)，大多数气泡一般不会出现重叠和形变现象，或者重叠和形变的幅度较少，基本上不影响宏块内气泡的位置、形状及其内的像素点灰度值。

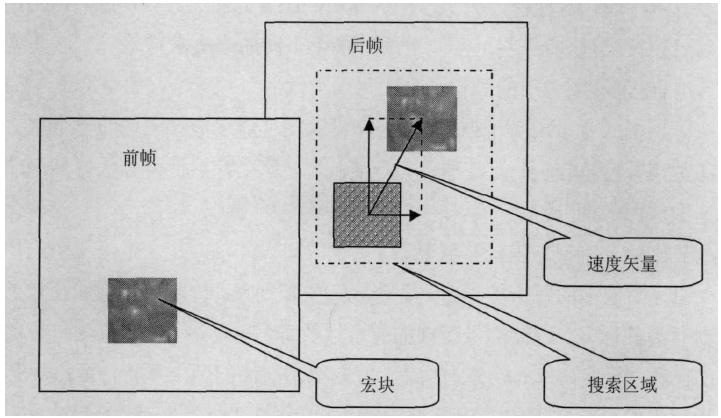


图3-5 宏块跟踪示意图

宏块跟踪法估计泡沫运动速度的基本实施过程是:取连续两帧泡沫图像并转化为灰度图像;接着把它们均匀地划分为多个子块，并逐一寻找每个子块在后帧的最佳匹配位置;最后，利用欧拉公式计算出这些子块的位移，根据采样率确定两幅图像的采样周期，并计算位移与时间间隔的比率，即可得到各子块的运动速度矢量。

4.3.6形状特征提取

形状特征的提取主要是泡沫的面积、个数及其大小分布。采用分水岭分

割算法提取泡沫的形状特征。

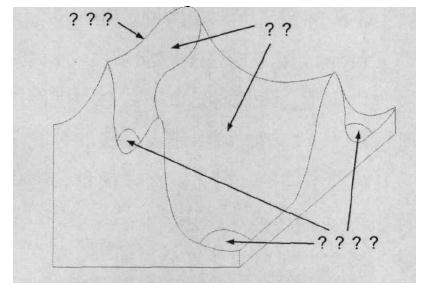


图3-6分水岭示意图

如图3-6所示，分水岭分割的基本思想，就是把图像看成是布满着许多盆地

的梯度地形，并且每个盆地都可能有不同的海拔高度，地形某点处的海拔即该点

的像素灰度值，待分割图像中的气泡边缘处像素点通常有较高的灰度值，对应于

地形的“分水岭”;每个气泡的内部像素点通常有较低的灰度值，对应于地形上的“集水盆地”。当把所有盆地的最低处刺破一个小洞，并把这块地形慢慢地浸入水中时，盆地将会被水慢慢的淹没，在盆地的边界处形成一道道的“分水岭”。这些“分水岭”将地形划分为许多个不同的“集水盆地”，这些“集水盆地”，就是泡沫图像中的等待划分的每一个气泡。

分水岭分割提取泡沫形状特征的基本处理过程是:从灰度级最小的像素点开始，扫描图像中的每个像素点，并作区域生长处理;分割得到泡沫图像的极小值区域且为其标号;统计标号相同的像素点数目，就得到了以像素为单位的每个气泡的面积。至此，分水岭分割结束，提取得到泡沫的两个形状特征:面积、数目。

根据图像灰度共生矩阵的定义，能量(Energy)用以指示图像分布均匀程度和粗细程度，嫡( Entropy)用来描述图像混杂度，惯性矩( Inertial Quadrature )用来表征图像灰度级变化范围。选取这三个参数对不同的泡沫图像进行分析，发现能量越大，则纹理越粗、越均匀;嫡值越大，纹理越复杂;惯性矩越大，则纹理越细、沟纹越深、图像越不均匀。可见，提取能量、嫡和惯性矩特征，在气泡难以分割的时候，能很好地描述泡沫状态变化[ss]，并且运算量小，适合计算机软件实时显示。能量、嫡和惯性矩的计算公式如下:

(3-4)

(3-5)

(3-6)

其中Ener , Entr和Quad分别代表能量、嫡和惯性矩，u、v为统计灰度值，G为图像的最大灰度级，p(u,v)为灰度相关矩阵函数。

4.4 线程池技术的实现

4.5 数据库的设计与实现

监控系统在运行过程中会产生数字图像序列、泡沫图像特征值、工艺参数实

际值和预测值、专家规则等信息。这些信息一般暂放在程序为其开辟的内存堆栈

中，等待后续线程及相关函数的处理。经处理，它们或被转化为工人们易于接受

和识别的图像、数值和文字等视觉信息，呈现在软件各个界面上;或被转化为Windows可识别的二进制数据流，以文件(图片和视频文件、数据库文件)的形式，保存在硬盘驱动器上，实现数据的永久化(Persistence )。下面以顶层数据流图、内部数据流图和数据表来描述数据库的设计过程。

4.5.1 数据流模型图

数据流图(DFD, Data Flow Diagram)是一种描述系统逻辑功能的图示表达方法，它反映了数据在系统内部的逻辑流向和逻辑变换的过程。它是结构化系统分析方法的主要表达工具及用于表示软件模型的一种图示方法。

数据流图包含顶层数据流图和内部数据流图两部分。顶层流图只包含一个加

工，用以表示被开发的系统，然后考虑该系统有哪些输入数据、输出数据流;而内部流图描绘数据在系统中流动和处理的详细过程。图4-2为软件系统的顶层数据流图。该图描述了整个系统的作用范围，对系统的总体功能、输入和输出进行了抽象，反映了系统和环境的关系，确定了宏观系统的外部实体和系统的数据输入源和输出对象。

分析结果表

结果记录

操作人员

软件系统

操作人员

图4-2 软件系统顶层数据流图

图4-2为软件的内部数据流图，又被称为下层数据流图。它按照自上而下、

从外到内的准则，将顶层数据流图中的加工分解成多个基本加工，同时表明每个

基本加工的数据来源和加工结果(输入数据流和输出数据流)，以及它们之间的

活动关系。

操作人员启动监控软件后，监控软件开始采集泡沫图像数据。泡沫图像数据

按照操作人员预设的方式(手动或自动)存储到计算机的外部存储器，同时送往泡沫图像特征分析模块，即速度分析、形状分析、颜色分析和纹理分析模块，计算出主要泡沫图像特征数据，同时，工艺参数预测模块获取主要泡沫图像特征数据，计算出pH值和矿物品位等工艺预测数据。泡沫图像特征数据和工艺预测值数据计算完毕后，通知数据管理模块写入数据库。专家知识系统截获分析这些数据，将分析结果显示出来。

4.5.2 图像分析数据表

图像分析数据表共有3个，分别记录了监控软件从粗选相机、粗扫相机和精

II相机采集的多帧泡沫图像中提取出来的泡沫图像特征平均值，以及根据相关的

图像特征值计算出来的主要工艺参数预测值。

4.6 专家系统的实现

设计专家知识库的思路是:针对某一特定工况下的泡沫状态，利用软件将其量化为具有一定泡沫图像特征值和工艺特征值的一组数据，从中选取能反映泡沫状态的几个典型特征，并设定好若干组阀值;如果软件计算出来的当前实时特征值恰好满足某一组阀值时，则采取相应的控制策略，使泡沫状态向最优态转化。现场操作工人浮选控制方面积累了大量的经验，通过总结他们的经验，制成泡沫物理特征与泡沫综合评价和控制策略一一对应的规则表，便得到了我们所需要的专家知识库。

# 第五章 总结

实习调研阶段主要是培养学生正确的设计思想、严肃认真的工作态度，深入细致的调查方法，主动和创造性地进行学习和工作。

近期结合选题进行了大量文献资料的检索和查询；收集了许多与毕业设计课题有关的数据、图表等资料；了解了国内外有关的先进技术及发展趋势，特别注意查阅了外文资料；调查了解与课题有关的软、硬件开发的全部过程及所有技术；调查了与毕业设计课题有关的环节中存在的问题与不足之处。

金锑浮选过程集中监视系统开发的难点在于图像处理的算法和VC++线程池实现实时监控技术，现在有许多用于泡沫浮选图像特征提取的算法，最常用的是分水岭法，这个算法不会出现欠分和过分的情况。线程池技术是一种多线程的实现方法，是一种优化的多线程技术，它会减少在创建和销毁线程上所花的时间以及系统资源的开销，如不使用线程池，有可能造成系统创建大量线程而导致消耗完系统内存以及过度切换。

这篇调研报告总结了常用的泡沫浮选图像特征提取方法，并初步设计了系统总体功能框架与软件总体流程，为以后做毕业设计打下了基础。

# 参考文献

[1] 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，2013，214-233

[2]瓜里尼.图像处理技术用于评估矿物浮选过程的质量[J}.国外金属矿选1999, 36(12):38-41

[3]Gao X B, Lu W, Li X L, et al. Wavelet-based contuorlet in quality evalution of digital images[J]. Neurocomputing, 2008, 72(1-3):378-385

[4]Citir C, Aktas Z, Ridvan B. Off line image analysis for froth flotation of coal[J].Computers and chemical Engineering, 2004, 28(5):625-632

[5]Cipriano A, Guarini M, Vidal R, et al. A real time visual sensor for supervision flotation cells[J]. Minerals Engineering, 1998, 11(6):489-499

[6] Cipriano A, Guarini M, Soto A, et al. Expert supervision of flotation cells using digital image processing[C]// Proceedings of the 20th International Mineral Processing Congress. Aachen: [s.n.], 1997:281-292

[7] Kaartinen J, Hatonen J, Miettunen J, et al. Image analysis based control of zinc flotation-A multi-camera approach[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore: [s.n.], 2002:920-925

[8] Kaartinen J, Hatonen J, Hyotyniemi H, et al. Machine-vision-based control of zinc flotation-A case study[J].Control Engineering Practice, 2006,14(12):1455-1466

[9]Chenga T W, Holthamb P N.The particle detachment process in flotation[J]. Minerals Engineering, 1995, 8(8):883-891

[10] Holtham P N. On-line froth acoustic emission measurements in industrial sites[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(12/14):883-888

[11] Holtham P N, Nguyen K K. On-line analysis of froth surface in coal and mineral flotation using JKFrothCam[J]. International Journal of Mineral Processing,2002, 64(2/3):163-180

[12] Nguyen K K, Thornton A J. The application of texture based image analysis techniques in froth flotation[C]// Proceedings of the 3rd Conference on Digital Imaging Computing Techniques and Applications. Brisbane: Australian Pattern Recognition Society, 1995:371-376

[13] Lin B, Recke B, Knudsen J K H. et al. Bubble size estimation for flotation process[J]. Minerals Engineering, 2008

[14]Yang CH H, Xu morphological C H, Mu X M, et al.21(7): 539548.Bubble size estimation using interfacial information for mineral flotation process monitoring[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3):694-699

[15]Wang W, Li L. Image Analysis and computer vision for mineral froth[C]//Proceedings of the IEEE International on Mechatronics& Canada: IEEE Publication Service Center, 2005:1790-1795

[16]Gorain B K, Franzidis J P Manlapig E V，et al. Studies on impeller type,impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 3:Effect on superficial gas velocity[J]. Minerals Engineering, 1996, 9(6):639-654

[17]刘喜英，吴淑泉，徐向民.基于改进分水岭算法的医学图像分割的研究[[J]. 微电子技术，2003, 31(4):39-42