DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.005

基于图像处理的矿用乳化液浓度在线检测

李亚彬,臧铁钢*,宣 梦,赵 昆
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要: 针对传统矿用乳化液浓度检测方法的需人工取样、有滞后性、测量精度低等普遍存在的问题,对光入射到乳化液后的成像进行了研究,提出了一种基于光全反射原理的专用光学检测系统。对成像进行了几何建模,研究了其特性参数与乳化液浓度的关系,采用建立的函数关系对各种不同浓度的乳化液进行了检测。实验结果表明,基于图像处理的在线检测法检测精度可达0.001%,相比于传统检测方法的检测精度0.5%,具有更高的精度和可靠性。该检测方案克服了传统检测方法无法实现在线检测的缺点,具有很好的实用性。

关键词: 乳化液浓度检测;CCD;图像处理;灰度处理;阈值处理
中图分类号: TH741; TP271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4551(2015)04-0464-06

Online detection of the mining emulsion concentration based on image processing

LI Ya-bin, ZANG Tie-gang, XUAN Meng, ZHAO Kun
(Collage of Mechanical and Electronic Engineering, NanJing University of Aeronautics and Astronautics, NanJing 210016, China)

Abstract: Aiming at the common existing problems of traditional detecting methods for emulsion concentration such as needing manual sampling, having a lag and low measuring accuracy, the image of the light incident to the emulsion was studied.A kind of special detection system based on the principle of the total reflection of light was put forward. The image´s geometric model was established.The relationship between the characteristic parameters and the emulsion concentration was researched. A variety of different concentration emulsion was detected using the relationship.The results indicate that the precision of the online detection method based on image processing can reach 0.001% and has higher precision and reliability compared with the traditional detection method´s precision of 0.5%. The detection scheme overcomes the shortcomings of traditional detection methods and has a good practicability through experimental verification.

Key words: emulsion concentration detection; CCD; image processing; gray processing; threshold processing

0 引 言

在矿业生产中,大部分器械都采用液压系统。传统的液压传动介质(液压油)并不适合在矿业这种环境下使用,专门的乳化液被采用作为传输介质,其浓度直接影响着矿用机械的性能和使用寿命,国内外也对乳化液浓度的检测作了广泛的研究。传统的乳化液浓度检测方法有破乳法、折光仪法、声衰减法(超声波)、光全反射法、浑浊度法和光栅法等[1-5]。破乳法作为最为传统的乳化液浓度检测方法,主要原理:用破乳剂将乳化液中表面活性剂分中和使油水分,待油水完全分离,读出乳化油的容量,除以所测乳化液的容量就是所测乳化液的浓度值,该方法检测精度较理想,但是整个检测时间太长,一般为3 h~10 h,具有很大的滞后性。便携式折光仪因其操作方便、便于携

收稿日期: 2014-12-01
作者简介: 李亚彬(1990-),男,江苏盐城人,主要从事基于图像处理的矿用乳化液浓度在线检测方面的研究. E-mail:xiangyu2008827@126.com
通信联系人: 臧铁钢,男,副教授,硕士生导师. E-mail:ztglc@nuaa.edu.cn

带、检测时间较短,现在是乳化液检测普遍采用的检测方法,其主要原理是根据阿贝原理设计的光学折射系统,经过折射系统的成像的明暗分界线位置与折射率成线性关系,在低浓度时乳化液浓度与折射率成线性关系。所以研究者就可以通过测量分界线的位置计算乳化液的浓度值,然而这种测量方法成像的分界线比较模糊,存在着很大的人为误差,而且并不能达到在线检测的目的。传统的乳化液浓度检测方法都无法实现在线,这样就会存在很大的滞后性,使配比乳化液浓度值低于或高于额定定值,这样就会导致液压器件的腐蚀或造成液压油的极大浪费。

随着机械自动化的发展,迫切需要一套乳化液浓度在线检测系统,为实现乳化液浓度的自动配比提供条件。结合前人的相关研究经验,本研究设计基于光全反射原理矿用乳化液浓度在线检测系统,利用图像处理技术对光的全反射成像进行处理,得到成像的特征信息,建立特征信息与乳化液浓度之间的函数模型,实现乳化液的浓度的在线检测,并通过实验对检测系统进行验证。

1　基于图像处理的矿用乳化液浓度检测系统构成

矿用乳化液浓度检测系统的主要包含3个部分,分别为光学成像系统、图像采集系统和图像处理系统。光学成像部分主要由理想的电源和照明系统构成,光照系统提供稳定均匀的类似太阳的光源,光源照射在配比好的乳化液上,光线入射到成像系统在物镜上形成明显的光暗图像,图像采集系统中的电荷耦合元件CCD将其转换为电压信号,由A/D转换为数据信号存储在FIFO数据存储器中,传给计算机相应的图像处理系统,用图像处理后得到相关的参数计算乳化液浓度值,根据所测浓度的大小对乳化液的配比系统做相应的反馈控制,使乳化液的浓度值稳定在一定的范围内,具体的系统结构如图1所示。

2　光学成像系统的设计及原理

光从一种介质斜射到另一种介质,由于介质密度和折射率不同,光会发生折射和反射,入射光线从光密介质到光疏介质(如图2(a)所示),入射角 α 、折射角 β 、光密介质的折射率 n_1 和光疏介质折射率 n_2 的关系可以用下式表示[6]:

$$n_{21}=\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1} \tag{1}$$

由公式可知随着入射角的变大,折射角将会达到

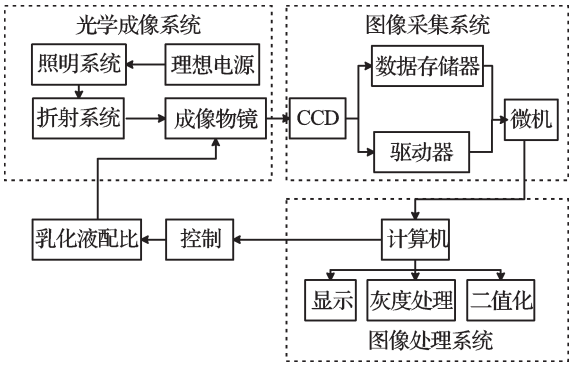
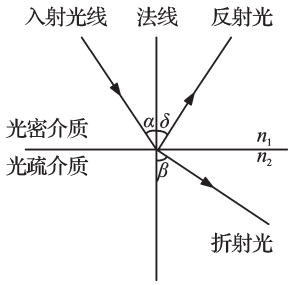
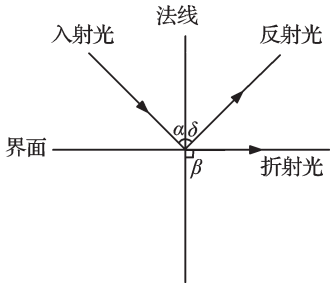


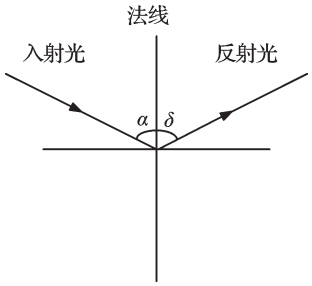
图1　乳化液浓度检测系统的总体方案



(a) 入射角小于临界角



(b) 入射角等于临界角



(c) 入射角大于临界角

图2　光的折射与全反射

最大90°(如图2(b)所示),如果入射角继续增大,光线将发生全反射(如图2(c)所示)。

本研究根据光全反射原理设计了一个乳化液浓度的在线检测装置,成像系统原理图如图3所示。乳化液放在三角棱镜的斜面上,光线经乳化液和棱镜的斜面发生折射,再经过棱镜和空气的分界面发生二次折射,由于折射率的不同,在物镜上会形成分界线明显的光暗图像,如图3中的光线 A (低浓度的乳化液)和光线 B (高浓度的乳化液)折射所成的像,根据分界

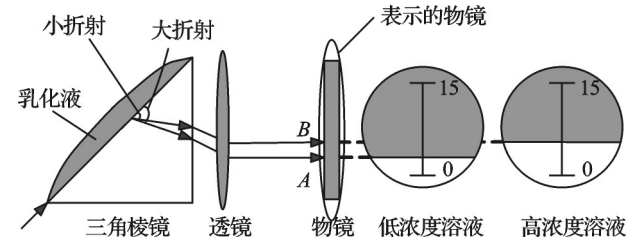


图3 成像系统原理图

线的位置和三角棱镜的一些几何参数，可以计算出所测乳化液的折射率，即可以建立一个分界线位置和折射率之间的映射，在浓度较小的情况下，溶液浓度的变化和折射率的变化成一定的线性关系[7]，即折射率和乳化液浓度之间存在一种线性映射，结合两个映射就可以得到分界线位置和乳化液浓度之间的映射关系，所以经过测量物镜里成像分界线的位置就可以计算乳化液的浓度值。

3 基于DSP的图像采集系统开发

电荷耦合元件CCD将成像系统的图像转换为相应的模拟信号，由于实际采集时会带有一定的干扰信号，而且模拟信号不可以直接处理，本研究对其进行相应的滤波、放大和A/D转换等处理，将模拟信号转换为数字信号。在数字信号处理方面，DSP（digital signal processing）具有强大的数据处理功能和快速的运算能力，在图像信号及其他信号的分析、变换、滤波、检测、调制、解调和快速算法等具有巨大应用优势，所以本研究设计了用CCD采集和DSP预处理图像信号的处理系统，具体的框图如图4所示。

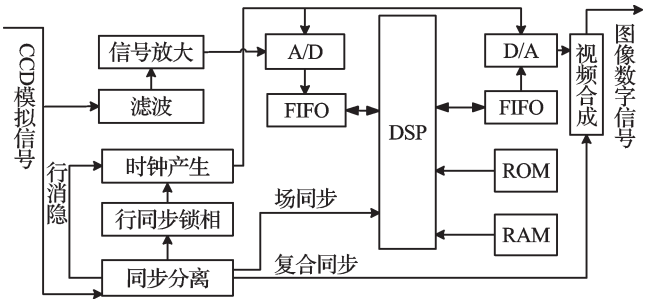


图4 图像处理系统硬件电路框图

整个图像系统的基本原理和执行过程为：首先将CCD模拟信号滤波，将干扰信号滤除，通过信号放大电路，将图像的信号放大由A/D转换为可以存储的数字信号，同时将CCD模拟信号进行同步分离，分离出来的行消隐信号来启动时钟，由该时钟给A/D和D/A转换模块提供时钟信号。经过滤波和信号放大后就可以对数字信号进行数据存储等操作。本研究采用FIFO先入先出存储器进行数据的存储，允许使用DMA直接存储器进行通信，这样就可以将图像的数据快速的存储到DSP中，经DSP处理后再通过DMA、FIFO和D/A转化为图像信号，和开始行消隐的信号进行复合同步形成完整的图像信号，经过这一系列的处理后，再对该图像信号进行锐化、灰度处理和二值化等图像处理。

4 基于OpenCV的图像处理系统的设计

4.1 基于大津阈值的图像特征区域的提取

在色度学理论中，颜色是由红、绿和蓝3种基本颜色混合组成的，这便是色度学中的三基色原理。图像是由一个个具有自己颜色属性的像素组成的，颜色属性就是由3种颜色各自的颜色值相结合确定的，在三维空间中任何事物都有其颜色属性，组合起来就是人眼观察到的自然界了，也可以用下式表示：

$$f(x,y,z)=\{f_{\mathrm{red}}(x,y,z),f_{\mathrm{green}}(x,y,z),f_{\mathrm{blue}}(x,y,z)\} \tag{2}$$

除了RGB颜色模型表示颜色外，还有YUV、HSV、HSI、CHL、LAB、CMY等模型，这些颜色模型也可以通过相应的矩阵变换相互转换，将二维图像的颜色属性用相应的二维数组存储，就得到图像的数据格式。按照二维数组定义的不同，可以得到不同格式的图片格式如：bmp、lab、tiff、jpg、gif等，在图像处理中最常用的格式为bmp，各种图像算法也是基于这种格式进行的相应处理。本研究主要研究的图像信息是基于bmp和LAB的，LAB和RGB颜色模型相互变换模型的变换可以用下式表示：

$$\begin{aligned}
L&=Y=0.212\,6\cdot \mathrm{R}+0.715\,2\cdot \mathrm{G}+0.072\,2\cdot \mathrm{B}\\
A&=1.474\,9\cdot(0.221\,3\cdot \mathrm{R}-0.339\,0\cdot \mathrm{G}+0.117\,7\cdot \mathrm{B})+128\\
B&=0.624\,5\cdot(0.194\,9\cdot \mathrm{R}+0.605\,7\cdot \mathrm{G}-0.800\,6\cdot \mathrm{B})+128
\end{aligned} \tag{3}$$

LAB颜色空间中，L（Luminosity）表示照度即亮度，A表示红色到绿色的颜色范围，B表示黄色到蓝色的颜色范围，LAB具有比RGB更广的色域范围，3个通道（LAB）中，一个表示亮度，两个表示颜色空间，研究者可以更灵活地处理有光照或亮度变化明显的彩色图像，利用图像处理的相关算法提取LAB图片的亮度特征和颜色特征，结合这3个特征信息就可以得到目标特征信息。

图像处理的相关算法由很多，其中大津阈值法是一种自适应阈值法，主要原理是选取一灰度值T将图像分为两部分（前景和背景），当T设定的越不合理就会导致这两部分的差别越小，所以可以遍历0~255所有灰度值，求得使类间方差最大的灰度值T，用这个灰度值阈值划分图像就可以得到最理想的前景和背景。例如宽、高像素数分别为X和Y，定阈值为T，前

景的像素数和平均灰度为 F 和 μf，背景的像素数和平均灰度为 B 和 μb，根据大津阈值的定义计算最大类间方差的算法[8]，具体的算法如下：

$$w_0 = \frac{F}{X \cdot Y} \tag{4}$$

$$w_1 = \frac{B}{X \cdot Y} \tag{5}$$

$$w_0 + w_1 = 1 \tag{6}$$

$$u = w_0 \cdot uf + w_1 \cdot ub \tag{7}$$

$$f(T) = w_0(uf - u)^2 + w_1(ub - u)^2 \tag{8}$$

将公式(7)代入公式(8)中简化后得：

$$f(T) = w_0 w_1 (uf - ub)^2 \tag{9}$$

整个图像处理过程主要是对图像中像素的颜色属性的处理，首先对图像进行几何校正、灰度变换、噪声滤波平滑处理等，而该系统主要研究成像系统在物镜上的成像，成像主要特征为黑色的背景和成像区域，成像区域有明显的白蓝两部分组成，具有3个明显的区域：黑色、蓝色和白色，而且亮度也是这幅的组要区分点，白色的区域亮度最大，蓝色的其次黑色亮度最小几乎为零，它的灰度直方图如图5所示，主要分为3个部分。

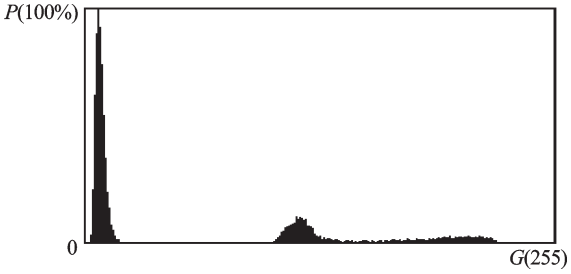


图5　被测对象RGB转GRAY的灰度直方图

本研究由此设计整个图像处理程序的整个流程，首先对由CCD得到的信号进行滤波后，再进行RGB—LAB颜色空间转换，将得到的LAB图像的3个通道分别保存在一个单通道图像中，考虑多次测量图像的差别可以使用自适应阈值法（大津阈值法）对这3幅图像分别进行处理，因为成像的主要特征为亮度、蓝色和白色，经过LAB三通道的阈值处理后可以得到理想的特征区域。具体的程序处理流程如图6所示。

4.2　乳化液浓度值算法推导

图像经过处理得到目标区域的像素总数和蓝白两个区域的各个像素总数，根据几何的相似性可以得到总面积 S 和蓝色区域面积 S_b 和白色区域面积 S_w 之间的比值，设白色面积与总面积的比值为 λ，设此时的溶液浓度为 η，每次测量都会得到 λ_1、λ_2、λ_3、λ_4、λ_5 和 η_1、η_2、η_3、η_4、η_5 等，它们是一一对应的关系，即 λ 和 η 之间存在一种映射如下式所示：

$$\eta = f(\lambda) \tag{10}$$

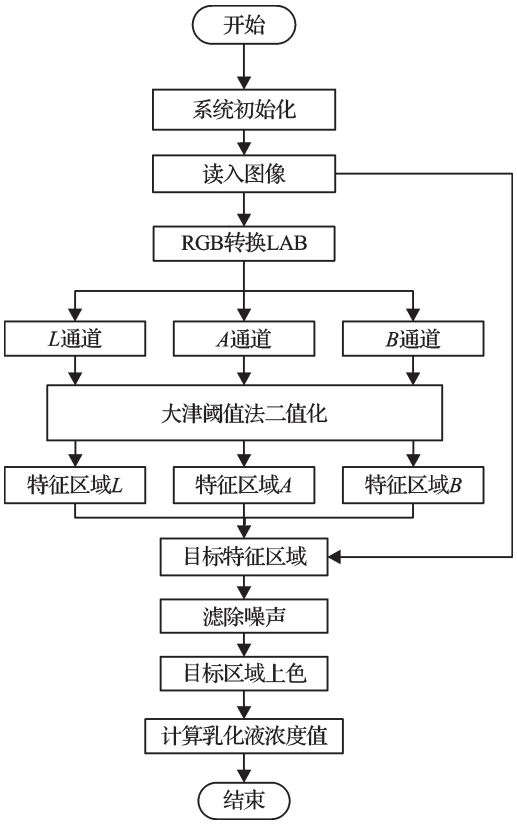


图6　图像处理系统程序流程图

笔者根据所研究的对象建立其二维几何图形，建立合理的坐标系研究其几何特性，二维几何模型和所建立的坐标系如图7所示。

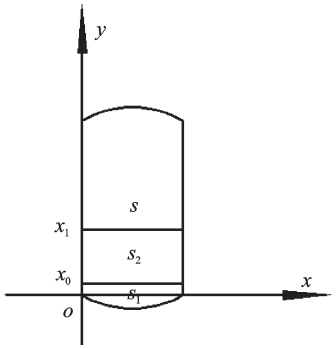


图7　二维几何模型和坐标系

本研究设 x_0 和 x_1 对应的分别是两次测量的分界线位置，S_1 是 x_0 对应下半部分的面积（白色区域），S_2 是 x_1 对应的面积，S_0 为 x 轴下面那部分弓行的面积，η_0 和 η_1 分贝为两次测量对应的浓度值，λ、η、S_n 分别代表任意一次测量所代表的白色区域的面积与总面积的比值、所测乳化液浓度值和白色区域的面积，设圆的直径为 d，左右截线的距离为 w，则可计算它们之间的关系如下式所示：

$$S_n = S_0 + x \cdot w \tag{11}$$

$$\lambda = \frac{S_n}{S} \tag{12}$$

将式(12)代入式(11)得：

$$x=g(\lambda)=\frac{S}{w}\lambda-\frac{S_0}{w} \tag{13}$$

因为折射率和乳化液浓度在低浓度范围内是成线性关系的[9-12]，成像系统是根据阿贝原理设计的，分界线位置与折射率成线性关系，即乳化液浓度与分界线的变化率成线性关系，根据测量得到两组数据（x_0，η_0）和（x_1，η_1），建立方程可以用公式(14)表示。

$$\eta=q(x)=k\cdot x+b \tag{14}$$

$$k=\frac{\eta_1-\eta_0}{x_1-x_0},b=\frac{\eta_0x_1-\eta_1x_0}{x_1-x_0} \tag{15}$$

将式(13)代入式(14)得：

$$\eta=f(\lambda)=\frac{S}{w}k\lambda+(b-\frac{S_0}{w}k) \tag{16}$$

式中：S，w，k，b，S_0—常数。

式(16)可以简化为公式(17)：

$$\eta=f(\lambda)=k_1\lambda+b_1 \tag{17}$$

式中：k_1，b_1——常数。

由式(17)知 η 和 λ 成线性关系，所以式(10)是一阶线性函数。研究者根据两次标准实验的测量结果（λ_0，η_0）和（λ_1，η_1）求得式(17)的线性方程的系数 k_1 和 b_1，编写相应的处理函数，就可以测得任意浓度的乳化液浓度值。

4.3 检测系统的GUI人机界面开发

检测系统的GUI的设计是基于MFC面向对象的程序开发的，本研究以图像采集系统中CCD采集的模拟信号为对象，基于OpenCV类库的图像处理程序，建立一个人性化的乳化液也浓度检测系统。OpenCV（Open Computer Vision）类库是开放的源码，可以方便获得和修改，具有强大的图像和矩阵运算能力，支持多种平台如Windows和Linux等。本研究借助于OpenCV可以对图像进行阈值处理、线性变换、边缘检测、蚁群边缘检测等处理。MFC具有丰富的图形界面类库，可以建立人性化的人机界面，显示处理的结果，便于人机交互实现在线地处理和控制乳化液的浓度，处理过后的GUI的显示如图8所示。

4.4 实验及结果分析

经过算法验证，乳化液浓度值只与白色区域与总面的比值 λ 有关，这样就避免了在安装检测装置时所带来的系统误差，只要保证成像在可以采集到的范围内，就可以根据相应的算法计算出乳化液的浓度值，

图8 基于MFC设计图像处理界面

而且精度也不会降低。通过测量不同浓度的乳化液，与传统乳化液浓度检测方法相比较，实验结果如图9所示。

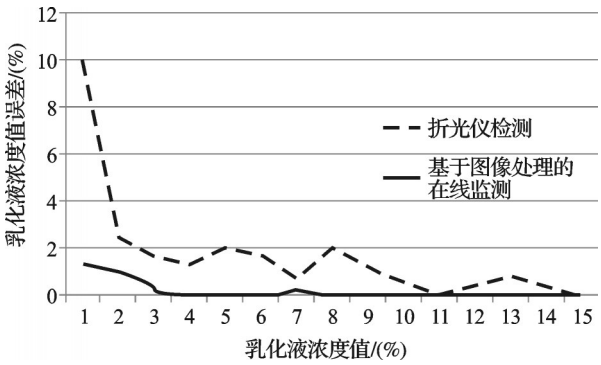


图9 两种实验方法检测结果分析

传统检测方法的检测精度只能到达0.5%，而基于图像处理的在线检测系统检测精度可以达到0.001%，尤其在测量浓度值比较低的乳化液时，在线检测系统具有较小的误差，而且在测量任意浓度的乳化液时，在线检测系统具有更好的稳定性，测量误差在2%以内，完全达到工程实际的要求，解决了传统检测方法检测精度低的缺点，实现了在线检测乳化液的浓度，大大地减轻了操作人员的劳动强度，提高了检测精度。

5 结束语

本研究提出的系统是基于OpenCV类图像处理技术设计的矿用乳化液浓度检测系统，相对于传统的测量方法，成像系统克服了传统方法的采样时间长和人工强度大等缺点，具有更高的检测精度，检测精度可达0.001%。而且测量精度不受安装时带来的一些位

（下转第478页）

本文引用格式：

李亚彬，臧铁钢，宣 梦，等. 基于图像处理的矿用乳化液浓度在线检测[J]. 机电工程，2015，32(4)：464-468，478.

LI Ya-bin, ZANG Tie-gang, XUAN Meng, et al. Online detection of the mining emulsion concentration based on image processing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2015，32(4)：464-468，478.