

武汉工程大学

Wuhan Institute Of Technology

# 硕士学位论文

## 基于 MATLAB 的磨损分析测量研究

类型/领域： 机械工程

研 究 生： 刘 莉

指导教师： 秦襄培 副教授

张向明 高级工程师

培养单位： 机电工程学院

二 〇 一 五 年 五 月



分类号：TP391

学校代号：10490

学 号：201302060

密 级：公开

武汉工程大学硕士学位论文

# 基于 MATLAB 的磨损分析测量研究

作者姓名： 刘莉                      指导教师姓名、职称：秦襄培 副教授

申请学位类别：工学硕士      学科专业名称：机械工程

研究方向：摩擦学、图像处理

论文提交日期：2015 年 5 月 9 日    论文答辩日期：2015 年 5 月 23 日

学位授予单位：武汉工程大学    学位授予日期：    年    月    日

答辩委员会主席： 樊自田



# **Research on the Wear Analysis and Measurement Based on MATLAB**

A Thesis Submitted for the Degree of Master

**Major: Mechanical engineering**

**Candidate: Liu Li**

**Supervisor: Prof. Qin Xiang pei**

Wuhan Institute of Technology

Wuhan, Hubei 430073, P. R. China



## 独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位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，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：刘莉

2015年5月28日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解我校有关保留、使用学位论文的规定，即：我校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅。本人授权武汉工程大学研究生处可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密 ☐ ， 在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本论文属于

☒ 不保密 ☐ 。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：刘莉

2015年5月28日

指导教师签名：

秦克培

2015年5月28日





## 摘 要

磨损是摩擦学三大基本内容之一，在现代工业社会，不管是轻工业还是重工业都存在着磨损现象，而由于磨损造成的损失是巨大的，因此研究零件的磨损规律，发展磨损试验方法对于提高零件的寿命和可靠性是极为重要的。本文以销盘式试验机试样滑动摩擦产生的环形磨痕为例，运用两种测量磨痕宽度的方法，一种是标尺法测量，另一种是投影法测量，实现了磨痕的快速测量，并对投影法测量方法进行了拓展研究，主要研究内容如下：

(1) 本文对国内外磨损测量现状做了初步研究，总结了磨损量现有的测量方法，并对各种方法的利弊进行了详细的阐述。

(2) 设计了图像的预处理算法，首先对图像进行灰度化处理，再对图像阈值分割，通过比较不同的阈值分割方法的结果，选取了 Otsu 阈值法得到二值图像，再通过数学形态学处理方法对二值图像中非磨痕的噪声点进行删除，得到突出磨痕的图像。

(3) 运用了两种方法测量磨痕的宽度，投影法和标尺法，投影法的测量过程比标尺法复杂，但是对于形状不规则的磨痕来说，投影法优于标尺法，而且投影法能够排除人为干扰，测量结果更为准确。本文基于 MATLAB GUI 打包了磨痕测量软件，包括文件、图像灰度化、阈值分割、数学形态学处理、磨痕宽度测量以及磨痕的面积测量六个模块，该软件能够实现磨痕宽度以及面积的快速测量。

(4) 本文提出的投影法测量方法，不仅能够运用于测量磨痕宽度问题，也适用于其他领域内的测量问题。特别是在实验室设备有限的情况下，对于毫米级以下的宽度测量投影法将是很好的选择，且投影法测量精度高于标尺法测量。

**关键词：**MATLAB；图像处理；投影法；磨损测量



## Abstract

Wear is one of the three basic contents of Tribology, in modern industrial societies, there are signs of wear either in light or heavy industry, and losses which were caused by wear is enormous, so study part of the wear pattern and development method of abrasion test for improving component life and reliability is extremely important. This paper introduced traditional and existing measurement methods, take ring wear which was produced by pin-on-disk wear testing machine as example, we introduced two methods of measuring wear width, one is painting line measurement method, the other one is projection measurement method. And we have done more continue expand researches about projection measurement method, the research achievements are mainly as follows:

(1) Firstly, we introduced the research at home and abroad about wear measurement, summarized traditional and existing of measurement methods, and described in detail the advantages and disadvantages of each method.

(2) We designed a set of preprocessing method before using the projection measurement method. First, we accomplished color image gray processing, then, we used different threshold methods process the gray image, and compared the results to choose the best threshold methods, finally we chose Otsu threshold methods to obtain the binary image. The segmentation was completed by morphology operations and we got the image that highlighted the wear region, Final projection method is used to measure the wear width, compared to scale method, projection method are more accurate without human intervention.

(3) Using both measuring methods, projection method and visual analogue scale, projection measuring process more complicated than visual analogue scale, but to irregular shape wear, projection method is better than the visual analogue scale and projection method are more accurate. Based on MATLAB GUI pack a wear scar measurement software, including files, images, grayscale, threshold segmentation, mathematical morphology, wear scar width measurement and wear scar measurement of area of six modules, the software is able to realize rapid measurement of wear scar width and area. We

built wear analysis and measuring software based on the MATLAB GUI, the software including files, gray processing, threshold segmentation, mathematical morphology, Wear width and area measurement, this software can realize the wear width and area rapid measurement.

(4) Projection measurement method is proposed in this paper can not only be applied to measure the wear width but also be applied to the field of tribology in the plating layer thickness determination. Despite the limited laboratory conditions, Nano-plating layer thickness is hard to determine, the projection method would be a good choice, and projection method has higher accuracy.

**Keywords:** MATLAB; images processing; projection method; wear measurement

# 目录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	III
目录 .....	V
第 1 章 文献综述 .....	1
1.1 研究的背景和意义 .....	1
1.2 国内外磨损测量方法的研究现状 .....	2
1.3 论文研究内容 .....	4
第 2 章 磨损边界的标尺法测量 .....	7
2.1 磨损图像的采集 .....	7
2.1.1 数码显微镜 .....	7
2.1.2 磨损图像的采集 .....	8
2.2 磨损宽度标尺法测量 .....	8
2.2.1 图像的导入 .....	8
2.2.2 磨痕宽度的测量 .....	9
2.3 本章小结 .....	11
第 3 章 投影法测量磨痕宽度 .....	13
3.1 投影法简介 .....	13
3.2 图像预处理 .....	14
3.2.1 图像灰度化 .....	14
3.3 图像分割 .....	16
3.3.2 图像分割定义 .....	16
3.4 图像阈值分割 .....	17
3.4.1 人工阈值法 .....	18
3.4.2 迭代式阈值选择 .....	19
3.4.3 Otsu 法阈值选择 .....	20
3.4.4 最小误差阈值选择 .....	22
3.5 磨痕图像的形态学处理 .....	24
3.5.1 MATLAB 中的常用数学形态学函数 .....	24

3.5.2 磨痕图像形态学处理 .....	25
3.6 磨痕宽度投影法测量 .....	28
3.6.1 规则磨痕宽度测量 .....	28
3.6.2 环形磨痕宽度测量 .....	30
3.7 磨痕面积测量 .....	33
3.8 本章小结 .....	34
第 4 章 磨痕测量系统的实现 .....	35
4.1 MATLAB 语言 .....	35
4.1.1 MATLAB 软件基本介绍 .....	35
4.1.2 MATLAB 软件特点与优势 .....	36
4.2 系统总框架 .....	38
4.3 系统窗口界面设计 .....	39
4.4 各个模块的实现 .....	42
4.4.1 文件模块 .....	42
4.4.2 灰度化模块 .....	43
4.4.3 阈值分割模块 .....	44
4.4.4 形态学处理模块 .....	45
4.4.5 宽度测量模块 .....	46
4.4.6 面积测量模块 .....	47
4.5 投影法在电镀层厚度测定上的应用 .....	48
4.6 本章小结 .....	50
第 5 章 论文总结和展望 .....	51
5.1 总结 .....	51
5.2 展望 .....	52
参考文献 .....	53
攻读硕士期间已发表的论文 .....	57
致  谢 .....	59

## 第 1 章 文献综述

### 1.1 研究的背景和意义

摩擦学包括三大内容，摩擦、磨损、润滑，而磨损是研究材料相互之间的作用和相对运动的一门表面科学技术<sup>[1]</sup>。摩擦学的研究开始是采用做实验的方式，后来涉及到计算机仿真，并和理论模型相结合；零件寿命的研究从一开始的简单观察失效发展到预测零件的磨损寿命；在材料方面已经发展到可以研制更加耐磨的材料；如今，研究领域已经从宏观摩擦学发展到纳米摩擦学<sup>[2]</sup>。其中，关于磨损的研究是重中之重。

在很多行业，不管是轻工业还是重工业都存在着磨损现象，比如各种机器之间的摩擦，或是加工工具与对象之间的摩擦，只要是两者接触且有相对运动，都会产生磨损现象<sup>[3]</sup>。磨损会降低零件使用寿命，继而影响零件的工作效率，最后严重的可能会报废，这样对于能源和材料的消耗是巨大的。根据有关数据显示，仅仅美国一个西方国家，由于摩擦磨损造成的损失占国民经济总值的 0.04，大概 1000 多亿美元。根据不完全统计，每年中国在摩擦磨损上的消耗少于美国，但是也达到 400 亿美元之多。现代机械产品的质量下降和寿命减少很大程度上是由于磨损的严重性。金属材料的优点在于机械性能好，承载能力高，尺寸不易发生变化，取材资源丰富，很适合运用于各种物理化学加工，那么对于机械行业来说，要想提高零件或是机器的寿命和耐磨性，必须要磨损试验来研究金属的耐磨材料的磨损规律。

图像处理技术开始于 1950 年左右，而引起人们的关注是在二十世纪八十年代<sup>[4]</sup>，随着图像技术的发展，如今研究领域已经延伸到光学和机器视觉等领域，经过长时间的摸索和创新，人们运用图像处理技术更加成熟，特别是一些算法上的改进使得运用更加简单化，软件和硬件都得到了很好的发展。从一副图像中提取出感兴趣的信息，通常采用图像处理技术中的模式识别以及对图像特征的纹理进行分析的方法，之后对图像

进行相应的变换，最后可以分析图像<sup>[5]</sup>。目前，采用计算机进行分析与识别已经称为潮流，图像处理在现代高新技术的发展下覆盖面越来越广泛，所涉及到科技的各个领域，同时也是现今社会生产实践的迫切需求。从简单的可见光谱延伸到能够研究各种光谱，从最初静止的图像发展到如今可以分析运动的图像，以及人工智能化的图像处理等，这些都能够说明目前阶段人们认识世界和改造世界已经离不开图像处理技术。同时，在围绕着人们生活的各个方面，比如医疗技术、电子信息工程、多媒体教室教学等等，随着以后信息领域技术的不断发展，图像处理技术将会在深度和广度两方面渗透到人们的生活中，成为人类生产和生活中不可或缺的内容<sup>[6,7]</sup>。

近年来，随着摩擦学研究的不断深入，计算机及其信息技术被应用到摩擦学<sup>[8]</sup>，在磨损表面特征获取以及磨损表面的图像处理都引入了图像处理技术，相较于之前的手工操作流程，人们的工作时效将会得到很大程度的提高，测量磨损量难题也得以解决。这些已经取得的成果告诉我们，解决磨损测量的难题离不开图像处理技术的发展，未来图像处理技术将是一个至关重要的发展方向。

## 1.2 国内外磨损测量方法的研究现状

摩擦和磨损的测量研究最初是从机械和力学的角度出发，在发展过程中许多问题也随着取得成果的同时浮现出来。材料的磨损是一种十分复杂的现象，人难肉眼观察，属于微观范畴，要想完整分析解释这个现象单单从机械学角度出发是不够的。

磨损测量的应用十分广泛，比如大型机床刀具的摩擦磨损测量、砂轮的摩擦磨损测量或是磨损状态识别等等。了解零件是否耐磨，零件耐磨性能的判定依赖于精确地磨损实验测定结果<sup>[9]</sup>。通过大量阅读相关磨损测量文献，总结出来目前测量磨损量的方法主要分为两大类，一类是直接法，直接法是直接检测式样磨损面的区域大小，面积、周长等参数。称重法、



测量直径法属于直接法；另一类是间接法，包括放射性同位素法、电阻法、电容法、电感法等。

称重法是采用计算材料质量的损失量来衡量耐磨性的方法，这种方法会受材料本身上的残留物的干扰，所以在称重之前要擦去残留物再烘干处理，称重法大多数用在测量密度不变的材料，如果是密度不均的一些复合材料，鉴于不同材料的密度不一样，用失重法会使得测量结果不准确，在销-盘磨损实验中测量盘磨损量的时候，因为磨损轮廓一般是不规则的，因此没办法准确得到磨痕表面积，只能采用表面轮廓仪对磨损部位的深度进行粗略估计。测量直径法是利用测量前后零件的直径变化来衡量磨损程度的方法，结果的准确度取决于测量工具的精度。放射性同位素法是在实验前将零件表面用放射性同位素活化，接下来定期检查放射线强度。电阻法是把被测量力转换成电阻值的一种传感器，这种方法分辨率较低，一般是大于 20 $\mu\text{m}$ 。电容法传感器是利用电容性质的一种测量装置，精度在 10 $\mu\text{m}$  左右。电感法测量精度较高，可达 0.01 $\mu\text{m}$ ，是根据电磁感应的原理，用线圈电感的变化规律来衡量磨损程度，完全可以用于一般实验室中磨损量的测量。还有一些测量方法，如铁谱法<sup>[10]</sup>、超声波法<sup>[11]</sup>、超薄表面涂层法<sup>[12]</sup>、表面形貌法<sup>[13]</sup>以及光干涉法<sup>[14,15,16,17,18]</sup>的应用也相当广泛。一般机器运转状态的检测采用的方法是铁谱法和超声波法；对于精确到纳米级的磨损量测量采用超薄表面涂层法；表面形貌法是利用专业测量仪器-表面形貌仪，与被测量零件接触时会划伤被测量零件表面是一大弊端，所以迫切需要寻求一种测量精度高，不破坏被测零件表面的测量方法。

近年来，摩擦磨损的研究开始涉及数字图像处理技术。20 世纪八十年代，德国 Horst Cgichos 为了观察聚脂盘片滑动的磨损特性，建立了一个光学监测系统，原理是运用图像处理方法检测出磨损边界，为分析磨损机制创造了很好的条件<sup>[19]</sup>。20 世纪 90 年代，英国 M.Koukash 等人在研究牙齿被修补后，牙齿所用的材料在特定时间内的磨损情况，通过摄像机，运用激光照射技术获得牙齿在磨损前后的等高线图，再将两条线

的高度相减以得到牙齿磨损的情况，继而为牙齿被修补之后的磨损测量提供了一种新的方法<sup>[20]</sup>。之后人们将图像处理技术运用到绘制图像，继而画出磨损的二维图像<sup>[21]</sup>。而且在美国，图像分析处理技术还被运用到检测材料的形貌上。20 世纪 90 年代，人们用为获得纤维材料钻孔质量，融合图像处理技术和数学形态滤波，实现了钻孔质量的快速测量。运用图像处理技术实现摩擦磨损分析测量，许多国家的科学家比如英国、美国、澳大利亚等都取得了一定的成果<sup>[22]</sup>。而他们所用的方法可分为两类：直接和间接方法。直接方法就是采用专业的设备，譬如光学传感器、照相机和检测电路一整套定时处理系统，可以直接测量并获得零件磨损表面情况，有较高的测量精度，但是使用这些方法需要的客观条件比较高，而且不具备广泛的适用性。间接法结合图像处理技术和计算机技术，目前广泛应用于实验室，它是测量和摩擦磨损相关的参数以及得到处理过程，然后采集图像分阶段进行分析。在本论文中，在图像处理技术的基础上，实现磨损磨痕宽度的快速测量，运用了标尺法测量磨痕的宽度，并提出了一种运用图像的统计性质的测量方法投影法实现磨痕宽度的自动测量，并基于 MATLAB 打包了磨损磨痕测量软件。

### 1.3 论文研究内容

本文的研究对象采用的是销盘式试验机的环盘式接触式样在端面上滑动摩擦实验时产生的环形磨痕，目的是测量磨痕的宽度以及面积参数，在使用画线法测量宽度的同时，提出了一种运用图像的统计性质-投影来测量磨痕宽度的方法，图像的统计性质-投影不仅可以用于解决磨痕测量问题，也可以运用到摩擦学其他问题，例如电镀层厚度的测量，最后得出结论，只要是新问题涉及到图像测量问题，都可以运用投影法来解决。本论文基于实现磨损磨痕的自动测量，研究内容包括以下几个部分：

- (1) 本文对国内外磨损测量现状做了初步研究，总结了磨损量现有的测量方法，并对各种方法的利弊进行了详细的阐述。
- (2) 设计了图像的预处理算法，首先对图像进行灰度化处理，再对图

像阈值分割，通过比较不同的阈值分割方法的结果，选取了 Otsu 阈值法得到二值图像，再通过数学形态学处理方法对二值图像中非磨痕的噪声点进行删除，得到突出磨痕的图像。

(3) 运用了两种方法测量磨痕的宽度，投影法和标尺法，投影法的测量过程比标尺法复杂，但是对于形状不规则的磨痕来说，投影法优于标尺法，而且投影法能够排除人为干扰，测量结果更为准确。本文基于 MATLAB GUI 打包了磨痕测量软件，包括文件、图像灰度化、阈值分割、数学形态学处理、磨痕宽度测量以及磨痕的面积测量六个模块，该软件能够实现磨痕宽度以及面积的快速测量。

(4) 本文提出的投影法测量方法，不仅能够运用于测量磨痕宽度问题，也适用于其他领域内的测量问题。特别是在实验室设备有限的情况下，对于毫米级以下的宽度测量投影法将是很好的选择，且投影法测量精度高于标尺法测量。



## 第 2 章 磨损边界的标尺测量法

### 2.1 磨损图像的采集

人们通常采用的输入图像的设备有显微镜、数字相机、高清摄像头，本研究采用的图像采集设备为数码显微镜，通过 USB 接口连接计算机与数码显微镜，MATLAB 软件读出数码显微镜窗口界面。

#### 2.1.1 数码显微镜

数码显微镜有很多称谓，照相显微镜、数字显微镜等等，表达的是同一个意思，它能够将镜头摄进去的实际物象通过数模转换，使其成像在电脑上或是显微镜自身的屏幕上。由于显示的设备不同，数码显微镜大致可分为两大类：一类是显微镜本身自带屏幕，另一种是通过计算机屏幕显示。自带屏幕数码显微镜也有三种，即台式数码显微镜、手提式数码显微镜、无线数码显微镜。数码显微镜有着与电子显微镜相当的放大倍率，其中便携式数码显微镜形状小巧，方便随身携带。数码显微镜是一种全新概念的显微镜，它结合了图像传感器，能够追踪数字图像处理整个过程，并将采集的图像显示在显示器或是计算机上进行观察分析，还可以实现测量、打印等功能。它的优点在于用图像传感器代替人眼观察，减少了人工工作量，有了数码显微镜，一些及时的图像信息可以完整的保存下来不会丢失，总而言之，数码显微镜最大的优点在于它可以实现自动观测无需人工操作，在一定程度上节省了人力物力。

本研究本着实用和方便的原则，使用的是采用计算机显示的便携式数码显微镜，使用 USB 接口，可以达到对于分辨率要求不是很高的图像获取的要求。

### 2.1.2 磨损图像的采集

磨损图像的采集对后续图像处理以及测量结果是否准确有着直接的关系，因此，在采集图像时要考虑到样品的摆放是否端正，光照是否均匀，样品表面有无损坏等等。本研究采用数码显微镜作为图像的输入设备，通过 MATLAB 软件读取图像并采集图像。数码显微镜分辨率为  $160 \times 120$ ，给定的标尺，每个像素点  $DIV=0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 。MATLAB 软件语言格式简单，图像输入和采集命令为 `videoinput`，程序为：

```
vid=videoinput('winvideo');
```

```
preview(vid);
```

采集的图像如图 2-1 所示：



图 2-1 磨损表面

### 2.2 磨损宽度标尺法测量

所谓标尺法测量磨痕宽度，就是在所需测量宽度的两边界上分别选取两个点，连成一条直线，这条直线就代表磨痕的宽度，计算这条直线的长度就是要求的磨痕宽度，是通过计算所画直线的像素个数乘以每个像素代表的实际长度得到宽度的真实值。

### 2.2.1 图像的导入

导入图像常见的有两种方法，首先打开 MATLAB 软件，第一种是 MATLAB 读入图像命令 `imread`，将存储在计算机上的图像读入窗口，实现程序为：

```
I=imread (file); %读入图像并将图像赋给变量 I  
imshow (I);      %显示图像
```

第二种是 MATLAB 界面里“Current Directory”中“go to on level”按钮，选择需要的文件，读入的图像如图 2-2 所示。

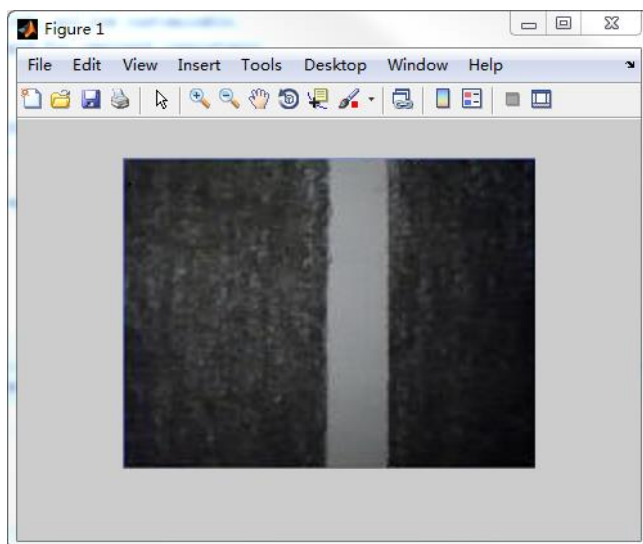


图 2-2 图像的导入

### 2.2.2 磨痕宽度的测量

标尺法测量磨痕的宽度，首先要在目标上选取两点连成一条直线，再测量直线的长度，即为磨痕的宽度。通过鼠标在图像上选取点获得坐标值有两种方法，第一种方法是运用 `ginput` 函数获取，第二种方法是利用 figure 的 Window Button DownFcn 属性。

#### （一）`ginput` 函数

`ginput` 函数实现的功能是返回所需要的坐标值，它给用户提供了一个十字光标，我们可以选择任何想要获取的点。函数调用形式有三种：

`[x,y] = ginput(n)`，对于 `[x,y] = ginput(n)`，其中的 `n` 表示能使你从当前的坐标系中选取 `n` 个不同位置的点，就会得到这 `n` 个点的坐标值，都是 `nX1` 的向量，如果想结束读取坐标，则只需按回车键即可。

`[x,y] = ginput`，`[x,y] = ginput` 不断读取数据直到敲击回车键才会停止。

`[x,y,button] = ginput(...)`，`[x,y,button] = ginput(...)` 意思是读取点的坐标，和 `button` 值，其中左键表示 1，右键表示 3，中键表示 2。

## （二）利用 figure 的 Window Button DownFcn 属性

当在窗口选择一个点，那么可通过 figure 的 Window Button DownFcn 设置一个相关的回调程序。在 MATLAB 窗口的程序表达以及一个编辑好的 M 文件均可表示回调程序。我们可以将选择的坐标值定义为显示程序或是一个坐标获取。

上述两种方法均能通过鼠标获取坐标值，相比两种方法，第一种方法操作比较简单，本研究采用了第一种坐标获取方法，即运用 `ginput` 函数实现。

在对磨痕宽度进行测量时，需要显示在选取两点后连线的线段，让测量界面变得更直观，同时也能判断选取的直线是否准确，运用 `plot()` 函数来实现。运用 `plot` 函数画连续线段时，首先需要把两点间的横坐标值离散化。当我们用在鼠标选取点时，由于所选取的点的相对位置的不确定性，存在以下五种情况：

- a) 第一点  $(x_1, y_1)$  在下方，第二点  $(x_2, y_2)$  在上方
- b) 第一点  $(x_1, y_1)$  在上方，第二点  $(x_2, y_2)$  在下方
- c) 第一点  $(x_1, y_1)$  在左方，第二点  $(x_2, y_2)$  在右方
- d) 第一点  $(x_1, y_1)$  在右方，第二点  $(x_2, y_2)$  在左方
- e) 两点连线水平或垂直

在编写程序处理横坐标值离散化时要区分上述几种情况，否则会出现线段画不出来，导致程序失效。根据数码显微镜提供的标尺，每个像素点对应的  $DIV=0.1mm*0.1mm$ 。



在对磨痕宽度进行标尺法测量时，为了保证测量的准确性，选取点在磨痕宽度边界上，必须保证所画线为直线，而且需要在磨痕上不同位置测量求取平均值以提高准确度，示意图如图 2-3 所示时，本文取五条直线测量求取平均值，如表 2-1 所示。可以看出，画线测量磨痕宽度的方法能够相对准确的计算出结果，通过求取直线的像素宽度，进而转化为实际宽度。在使用标尺法测量的时候要注意所连成的线必须是一条直线，否则结果将会不准确，出现误差。

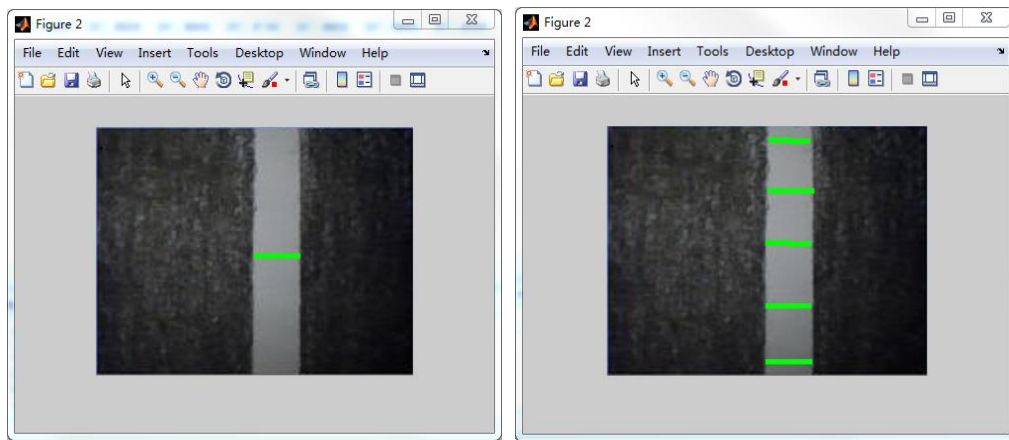


图 2-3 标尺测量示意图

表 2-1 标尺测量结果

	$(x_1, y_1)$	$(x_2, y_2)$	$(x_2 - x_1)$	$\overline{(x_2 - x_1)}$	宽度 $D = \overline{(x_2 - x_1)} * 0.1$ (mm)
a	(165,14)	(207,15)	42	45.6	4.56
b	(162,64)	(209,64)	47		
c	(160,113)	(206,114)	46		
d	(160,174)	(206,174)	46		
e	(160,229)	(207,229)	47		

标尺法测量宽度的方法使用简单直观，但是存在缺陷，在选取要测量的两点之间距离的时候，由于是肉眼观察，很难保证所选的两点位置

准确，因此，存在测量误差，有待改进，标尺法测量适用于精度要求低的参数测量问题。

### 2.3 本章小结

本章主要内容是采用标尺法测量磨痕宽度，首先介绍了运用数码显微镜采集图像，将数码显微镜镜头通过 MATLAB 窗口显示出来，采集图像并导入图像，然后介绍了两种通过鼠标在图像上选取点获得坐标值的方法，最后运用标尺法测量出了磨痕宽度。虽然标尺法测量步骤简单，无需对图像进行处理，但是存在一些缺陷，在选取两点连线的时候会产生人为误差，不能确定所选点是否准确，而且磨痕厚度不均时无法使用标尺法测量。

### 第3章 投影法测量磨痕宽度

#### 3.1 投影法简介

投影法的概念是投射射线经过物体向投影面投射，在投影面上得到图形的方法。在本论文中，测量磨痕的宽度，根据磨痕的特点，磨痕与其他区域颜色的差别，这里使用图像的统计性质-投影。投影量是选定一个方向，沿着这个方向截面投影，统计灰度值的集合，投影的示意图见图 3-1。图像函数为 $\{f(x, y)\}$ ， $s$  为投影方向， $t$  为与其垂直的方向， $t$  与 X 轴夹角为 $\theta$ ，则 $\{f(x, y)\}$ 沿着  $s$  的投影定义<sup>[22]</sup>为：

$$p(t, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t \cos \theta - s \sin \theta, t \sin \theta + s \cos \theta) ds \quad 3-1$$

特别地，在 X 轴上的投影定义为：

$$p_x = p(t, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t, s) ds = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dy \quad 3-2$$

在 Y 轴上的投影定义为：

$$p_y = p(t, \pi / 2) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(-s, t) ds = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx \quad 3-3$$

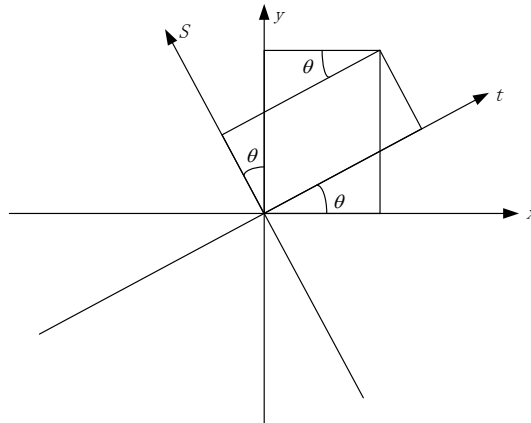


图 3-1 投影示意图

投影量是选定一个方向，沿着这个方向截面投影，统计灰度值的集合，那么在计算之前首先要将图像转化为黑白图像，以凸显磨痕特征与背景，所以在运用投影法测量之前，运用边缘提取和图像分割技术得到

图像中感兴趣的部分，也称作目标，这里的目标就是指磨痕区域，经过这两步，



得到的是若干区域和边界，识别不出来的区域叫做背景。为了达到测量效果，接下来的步骤是使计算机识别感兴趣部分。那么第一步就是要给出特征，或者是它们之间有无关系，形状分析就是提取出对象的边缘特征，结构分析就是运用软件对对象的组成进行分析。那么在我们选取了合适的拍照角度采集图像并进行阈值分割之后，通常我们得到的二值图像，磨痕区域是白色特征，背景区域为黑色特征，统计在 Y 方向上每一个 X 轴像素点对应的白点数可以得到一段投影量曲线，曲线上会出现相应的峰值和最小值，接下来再将投影量曲线进行微分，得到的微分曲线上的最小值和最大值点就是宽度的边界点，两点之间的长度就是要求的磨痕宽度值。

## 3.2 图像预处理

### 3.2.1 图像灰度化

通过数码显微镜采集到的图像是彩色的，图像的灰度化顾名思义是图像变为灰度，彩色图像即 RGB 图像，图像中每个点的色彩由三个分量组成，每个分量的中值范围为 0~255，计算下来任意一个像素点的颜色变化范围有  $255 \times 255 \times 255$  种之多。将彩色图像转换为灰度图像之后，R、G、B 三个分量变得一致，那么每个像素点的变化范围被限定在 0~255 之间，所以为了使得后面的图像处理或是计算变得简单一些，我们首先将各种形式的图像处理成灰度图像，即图像灰度化。灰度化之后的图像并没有削弱和改变图像特征，所以灰色图像不仅可以描绘出整幅图像的色彩，也能够描绘图像的亮度分布，当然对于图像的局部特征来说，彩色图像和灰度图像是一致的<sup>[23]</sup>。

在图像的 RGB 模型中，当三个分量  $R=G=B$  时，此时的图像彩色代表其中一种灰度颜色，其中设定的  $R=G=B$  的值被称为灰度值，又叫强度值或是亮度值。灰度图像的灰度范围在 0~255 之间，所以图像中的每个像素只需要一个字节存放灰度值。图像灰度化处理有三种方法：平均值

法、加权平均法、最大值法。本研究采用加权平均法进行灰度化处理，根据  $R$ 、

G、B 三个分量各自重要性和所占的比重，将它们以各自不同的权值进行加权平均。我们知道，当人们用肉眼观察时，最容易识别出来的是绿色，相反，最不容易分辨的是蓝色。所以，MATLAB 包含的系统函数可以将三个分量按照一定的方法进行平均，最后使得图像的灰度化水平合理。

3-4

MATLAB 函数库中已有的 `rgb2gray` 函数，能够实现彩色图像灰度化。灰度化处理之前，读取一个 RGB 格式的彩色图像，然后调用函数 `rgb2gray` 来实现彩色图像灰度化，表 1 介绍了 `rgb2gray` 函数。

表 3-1 `rgb2gray` 函数

语法	参数说明
<code>I=rgb2gray (RGB)</code>	将彩色图像 RGB 转换成灰度图像 I
<code>Newmap=rgb2gray(map)</code>	将颜色图 map 转换成灰度级颜色图

语法格式为：`I= rgb2gray(RGB)`，RGB 为原始图像，I 为灰度化后的图像矩阵。原始图像如图 3-2 所示，灰度化后的图像如图 3-3 所示。



图 3-2 原始图像

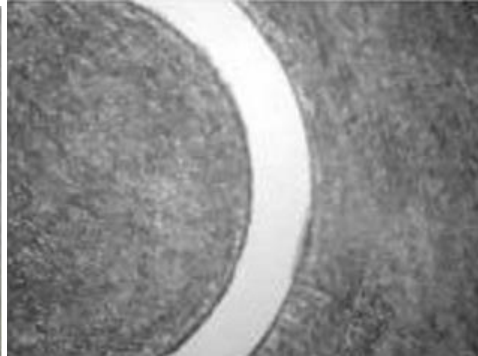


图 3-3 灰度化图像

### 3.3 图像分割

本章开头介绍了投影量是沿着图像某个方向截面的灰度值累加计算量的集合，因此在运用投影法测量之前要对图像进行分割，得到二值图像。





### 3.3.1 图像分割基础

图像分割是图像处理技术中很重要的模块，被广泛的应用在实际中，使人们逐渐重视起来，进而开始了大量的研究。运用于各个领域的时候，图像分割有不同的名称，比如阈值化技术和目标轮廓技术等等，虽然有不同的说法，但是这些技术本质上都是基于图像分割技术。

图像技术在字面上是一种和图像相关的各种技术的总称谓，根据用法的不同，将图像技术分为三个大类：图像处理、图像理解、图像分析<sup>[24]</sup>。图像处理目的是改善图像的视觉效果，将图像进行各种变换，比如图像复原、图像增强；图像分析的目的是描述图像，通过技术检测图像中自己感兴趣的目标，获得一定的参数或是特点；图像理解是以图像分析为前提，研究图像中感兴趣的目标的各种性质，以及各个目标之间有何种联系，并对图像的相关特征进行分析。

### 3.3.2 图像分割定义

图像分割指的是将一副原本完整的图像分割为多个特征独立、但是性质相同的有意义的区域。图像分割的成功与否取决于三点，一是分割出来的区域边界是清晰明了的，二是感兴趣的目标之间所依据的分割性质是有明显不同的，三是分割出来的区域内部是闭合连通的，且在特性上是相似的。

对于图像分割的定义<sup>[25]</sup>：用  $R$  代表图像， $I$  代表和  $R$  有着相同性质的逻辑谓词，经过图像分割之后，图像被分解成为  $N$  个区域  $R_i, i=1, 2, \dots, n$ ，满足：

3-5

3-6

3-7

条件①指的是待分割区域要包括整个图像，并要求各个区域不能有重叠，条件②指的是每一个独立的区域的性质要相同，条件③指的是相邻

的两个区域不能合并为一个区域，要求性质不同。在实际的图像分割中，找不到一种最优的方法兼顾这些条件，因为在图像获取的过程中会引入各种噪声导致图像质量下降，进而影响图像分割效果。本文根据投影法特点，采用阈值分割方法对图像进行分割。

### 3.4 图像阈值分割

阈值分割方法是以图像特征区域为基础，选择不一样的特征阈值，将图像中的像素点分为几个部分的图像分割技术。假如我们要分割的图像用 $f(x,y)$ 表示，设定相应的标准，得到多个特征阈值 $T_1, T_2, \dots, T_N$ ，最后将图像分割，分割后的图像用 $g(x,y)$ 表示，表达式为：

3-8

一般情况下，阈值运算是对于图像中点的灰度特性、点的位置以及点的一种局部特征的一种函数运算，把这种阈值函数标记为： $T(x,y,N(x,y),f(x,y))$ ，式中 $f(x,y)$ 是点 $(x,y)$ 的灰度值； $N(x,y)$ 是点 $(x,y)$ 的局部领域特性。根据不同条件约束下的 $T$ ，我们可以得到全局阈值、局部阈值、动态阈值三种不同类型的阈值。

全局阈值  $T=T(f(x,y))$ ，只与点的灰度值有关。局部阈值  $T=T(N(x,y),f(x,y))$ ，不仅和点的灰度值有关，也关系到局部领域特征。动态阈值  $T=T(x,y,N(x,y),f(x,y))$ ，与点的位置、点的灰度值、点的领域特征有关。

全局阈值  $T$  的选择直接影响图像分割的效果，一般情况下，我们通过分析图像的灰度直方图来选择阈值，原理是利用灰度直方图求多个峰值，那么选择两个峰值之间的谷底处的灰度值作为阈值。阈值分割法是



对灰度图像的一种假设：感兴趣的目标部分在相邻像素间的灰度值是相近的，但是每个不同的目标的像素灰度又是不一样的，这样我们得到的图像灰度直方图上，每个不同的目标都有自己不一样的最大值即峰值，这样我们选择的最佳阈值就是在两个最大值之间的凹谷对应的点。

本文通过比较人工阈值法和自动阈值法来确定最佳分割阈值。自动阈值法又包括迭代式阈值选择、Otsu 法阈值选择、局部阈值分割。对以上 4 种阈值分割结果图进行对比，最终确定合适的阈值分割方法。

### 3.4.1 人工阈值法

人工阈值分割法是最简单的分割方法，选择合适的阈值对于阈值分割是最关键的。通过观察，分析图像直方图，结合对图像的认识，人为的选择合适的阈值。或是人工选择适合阈值后，观察实际分割的效果，不断的进行阈值分割的交互操作，直到最后确定一个最佳阈值，到达想要的效果。本文中对图 3-3 进行阈值分割，得到的直方图如图 3-4 所示，从直方图可以看出，图中有两个峰值，两个峰值之间的最小值即为最佳阈值，从图中得到 0.7 为阈值。选取阈值 0.7 对图像进行二值化，二值图像如图 3-5 所示。

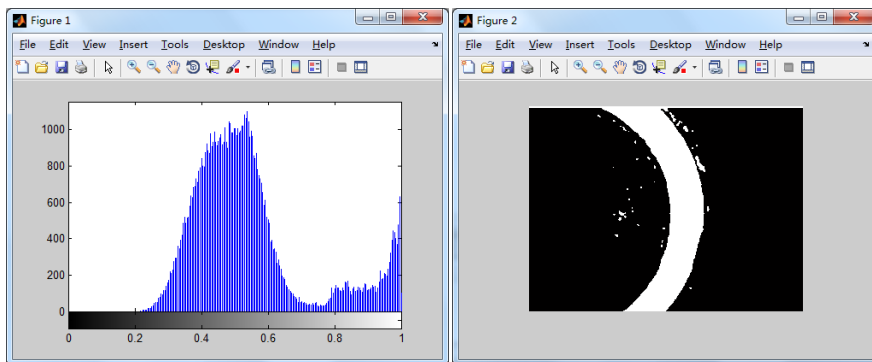


图 3-4 灰度直方图

图 3-5 人工阈值分割后图像

可以看出，人工阈值法操作简单，但是运用具有局限性，只有当灰度图像的直方图存在两个峰值，才能得到两个峰值之间的谷代表的最佳阈值的位置。

### 3.4.2 迭代式阈值选择

迭代式阈值选择的一般思路是：首先选择一个合适的灰度值作为初始阈值，然后按照某一种方法不断优化这个初始阈值，直到最后得到的阈值满足要求。那么在运用迭代法进行阈值优化的时候，关键点在于最初选择的灰度值以及运用怎样的优化方法。选择合适的优化方法遵循两个原则：一个是在优化过程中，初始值能够迅速收敛，第二个是在每一次优化过后，得到的阈值要比上一次的阈值要好。基于这两点，提出了一种方法：

第一步，按照迭代法阈值选择一般思路，首先选择一个初始阈值，这里将灰度图像的中值确定为初始值  $T_0$

第二步，按照选定的初始阈值，将图像分为两个部分， $G_1$  和  $G_2$ ，然后运用以下公式，分别得到  $G_1$  和  $G_2$  的灰度平均值  $\mu_1$  和  $\mu_2$ 。

公式为：

3-9

3-10

第三步，得到  $G_1$  和  $G_2$  的灰度平均值  $\mu_1$  和  $\mu_2$  之后，计算出  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的平均值，得到新的阈值

3-11

第四步，重复第二步和第三步，直到  $T_i$  和  $T_{i+1}$  的差值无限接近，小于某个给定的标准。

本文根据提出的迭代法阈值分割方法，对图 3-3 进行阈值分割，得到阈值  $T=0.6091$ ，阈值分割后图像如图 3-6 所示。

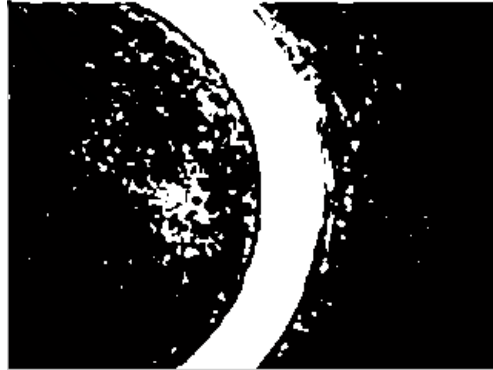


图 3-6 迭代法阈值分割结果

### 3.4.3 Otsu 法阈值选择

Otsu 法阈值选择<sup>[26]</sup>是一种自动确定阈值的方法，通过使类间方差到达最大，这种方法的优点在于运行速度快、操作简单。Otsu 法阈值选择的一般思路如下：

假设图像总的像素数为  $N$ ，灰度级范围在  $[0, L-1]$  之间，图像的每一个灰度级  $i$  对应的像素数为  $N_i$  个，那么概率为：

3-12

假如将图像中的像素用一个初始阈值  $T_0$  将灰度值分为两个部分  $S_0$  和  $S_1$ ，那么灰度值在  $[0, T_0]$  之间的像素组成  $S_0$ ，灰度值在  $[T_0+1, L-1]$  之间的像素组成  $S_1$ ，对于整幅图像的灰度分布几率均值为：

3-13

对于  $S_0$  和  $S_1$  来说， $S_0$  的均值为：

3-14



$S_1$  的均值为:

3-15

其中,

3-16

3-17

由以上的公式得到:

3-18

类间方差的定义为:

3-19

Otsu 法阈值选择的原理是: 初始阈值 $T_0$ 在灰度范围 $[0, L-1]$ 之间依次取值, 找到一个合适的 $T_0$ , 使得 $\sigma_B^2$ 取得最大的值, 这时的 $T_0$ 就是我们所求的最佳阈值。

运用 Otsu 法阈值选择对图 3-3 进行阈值分割, 最后求得的最佳阈值为 $T_0 = 0.6863$ , 经过 Otsu 法阈值选择最后得到的图像如图 3-7 所示。



图 3-7 Otsu 法阈值选择结果

#### 3.4.4 最小误差阈值选择法

最小误差阈值选择法是基于图像中的灰度值，设置图像灰度是随机变量，原始图像灰度值遵守某一种概率分布规律，那么可以得到最佳分割阈值服从最小误差选择法。一副图像中有目标以及背景，假设先验概率分别是 $P_0(z)$ 和 $P_1(z)$ ，平均值为 $\mu_0$ 和 $\mu_1$ ，设定 $\omega_0$ 为我们需要的目标的像素点占图像总的像素点的比例，那么图像的背景像素点占总的像素点数为 $\omega_1 = 1 - \omega_0$ ，那么混合密度计算公式为：

3-20

选定一个初始阈值  $T$ ，把目标像素点误当作背景像素点的概率为：

2-21

把背景像素点误当作目标像素点的概率为：

3-22

那么总的错误概率为：

3-23

最佳阈值就是使总的错误概率达到最小时侯的阈值，将式 3-23 对  $T$  求导，假设其为 0，得到式子：

3-24

对于正态分布：

3-25

3-26

将上式带入求导之后的公式，并在公式两边取对数得到：

$$\text{当 } \sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ 时,} \quad 3-27$$

$$\text{当 } \omega_0 = \omega_1 = \frac{1}{2} \text{ 时,} \quad 3-28$$

3-29

由以上可以得到，如果图像中的目标和背景的像素灰度是正态分布的，而且它们的标准差以及像素比例均相等，那么，目标的像素灰度均值和背景的像素灰度均值的平均值就是所求的最佳阈值。



图 3-8 最小误差阈值选择结果

对图 3-3 进行最小误差阈值选择，结果如图 3-8 所示。

本文采用阈值分割方法，对磨痕图像进行分割，从以上的结果可以得到，图 3-5 的人工阈值法和图 3-7 的 Otsu 法阈值分割得到的二值图像噪点最少，磨痕区域较清晰，其中图 3-6 迭代法和图 3-8 最小误差阈值得

到的图像噪点偏多。因此，为了简化后续操作，选择 Otsu 法阈值的结果作为后续处理的基础。

### 3.5 磨痕图像的形态学处理

#### 3.5.1 MATLAB 中的常用数学形态学函数

图像的处理以及二值图像的处理中有各自的特点。这四个运算可以单独运用于图像处理，也可以进行组合和推导成各种数学形态学运用算法，比如图像分割、边缘检测、特征抽取、图像增强、图像滤波<sup>[27]</sup>等等，这些都是对图像形状和结构的处理以及分析。数学形态学处理图像，首先选取一个合适的探针，这个探针被称作结构元素，探针的目的是采集图像的信息，通过使探针在图像中移动，我们就可以得到图像各个目标与背景之间存在着怎样的联系，那么就可以观察图像的结构和组成。所选取的结构元素，可以是图像的基本信息，比如图像的大小，灰度值，通过这些信息我们可以观察图像的组成和结构。数学形态学的用途十分广泛，它能够用在各种图像处理，例如数学形态学滤波去噪、基于目标识别的图像分割等等有关的方面。MATLAB 中常用的数学形态学函数为二值图像的运算函数，具体作用如下：

**dilate:** 对二值图像进行膨胀运算。

**erode:** 对二值图像进行侵蚀运算。

**bwmorph:** 二值图像形态运算。

**bwperim:** 确定二值图像中的目标边界。

**applylut:** 使用查找表进行领域操作。

**bwarea:** 计算二值图像中的目标区域。

**bwselect:** 选择二值图像进行膨胀运算。

**bwfill:** 二值图像背景区域填充。

**bwlabel:** 标识二值图像中的连接成分。

**makelut:** 构造查找表供 **applylut** 函数使用。

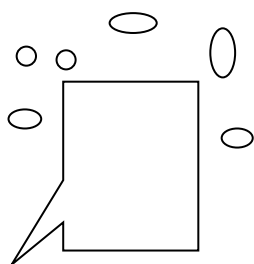
**bweuler:** 计算二值图像的欧拉数。

### 3.5.2 磨痕图像形态学处理

数学形态学运算中最基本的运算是腐蚀和膨胀，在保证图像信息和内部结构不被破坏的情况下，腐蚀和膨胀能够去除图像中的噪声，得到单纯的目标和背景。其中开运算是先腐蚀后膨胀，它能够去除掉图像中极小的杂质而不改变图像面积；闭运算是先膨胀后腐蚀，和开运算相反，闭运算能够填充图像中的空白点，但是不明显改变图像面积。将图像中的杂质去除和图像分割，得到感兴趣目标突出、图像内部连通外部分开的图像。通常在对图像内部的单个目标分析之前，将各个目标进行标号以便识别，这样在分析例如目标面积、长度等相关参数的时候不会混淆。

膨胀和腐蚀的对图像中的某区域进行计算，更准确的说是膨胀是通过相应的扩大目标区域去除噪声，而腐蚀是通过相应的缩小目标区域去除噪声。对于每一个单个的目标区域  $A$ ，膨胀是一步步地在  $A$  中添加  $\bar{A}$  的边界点，而腐蚀是一步步地去除  $A$  的边界点。换句话说，假设  $A$  的像素用数字 1 表示， $\bar{A}$  的像素用数字 0 表示，那么相应的，膨胀是将与  $A$  相邻的 0 值像素点转换成 1 值像素点，而腐蚀是将  $A$  的边界点转换成 0 值像素点。

一般情况下，图像内部的噪声不能够完全被去除，只能尽可能的抑制噪声，当我们将灰度化后的图像进行二值化处理的时候，又会不可避免的添加一些多余的杂质，噪声的存在对于后续提取目标特征的干扰是极大的，所以还需要对图像进行平滑<sup>[28,29]</sup>。二值图像中的目标一般是一块一块，那么其中的噪声会有多种形式，比较常见的是细小的小孔和点状图，如图 3-9 所示。细小的小孔和点状图的意思是指其面积相对较小的黑色像素和白色像素，那么通过腐蚀处理和膨胀处理或是两种处理的组合开运算和闭运算能够有效消除噪声。



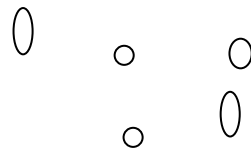


图 3-9 用散点图初步判定回归类型

因为我们最终的目的是得到清晰的磨痕，将磨痕与周围的背景区分开，为了选择一副更适合凸显磨痕区域和去除噪声的图片，分析阈值分割的结果，选择图 3-7 的阈值分割结果。

分析图 3-7，我们可以看到，图片大部分区域呈现黑色，磨痕区域以及周围一些噪点呈现白色，也能够看出来磨痕所包含的白色连通区域，相较于其他白色连通区域的面积要大的多的多。前面讲到有关数学形态学运算的内容，选取一个合适的结构元素的形状和尺寸是数学形态学运算最重要的点。由于磨痕形状的特殊性，首先设定一个动态尺寸的结构元素，先对图 3-7 的二值图像进行连通区域标记，然后对图像进行开运算操作。假如图像中的某些连通区域面积小于我们所设定的结构元素尺寸，那么根据开运算的定义，该白色连通区域会被填充而“消失”，如果图像中某些白色连通区域的面积大于我们所设定的结构元素尺寸，那么该白色连通区域将留下来。从图 3-7 可以看到，磨痕的面积明显大于其它的白色连通区域，那么只要我们选取的结构元素尺寸足够合适，那么最终开运算操作后将在整个图像中只留下磨痕的白色区域。

在本研究中，我们给出了当设定不同的开运算操作结构元素尺寸时，得到的若干张开运算结果图像，图 3-10、图 3-11、图 3-12、图 3-13 分别是选取结构元素面积为 50、80、200、400 时的运算结果。

分析以上结果可以看出，图 3-10 显示当结构元素为 50 的时候，开运算后白色区域有所减少，但依然还有多个白色连通区域；图 3-11 显示当结构元素为 80 的时候，图片中的白色区域相较于结构元素为 50 时更少，但是无用的白色连通区域仍剩下两块，磨痕目标区域和一块与磨痕白色区域相邻的较大的无用区域；经过多次选取适当的结构元素，图 3-13 显示当结构元素为 400 的时候，图中所有不需要的白色连通区域均被填充为黑色背景，只剩下磨痕区域。最终经过开运算操作，我们已

经成功去除了大部分背景冗余信息，突出显示了磨痕区域，这将大大增强后续的图像分析处理效率，并显著提高磨痕有关参数测量的精度。

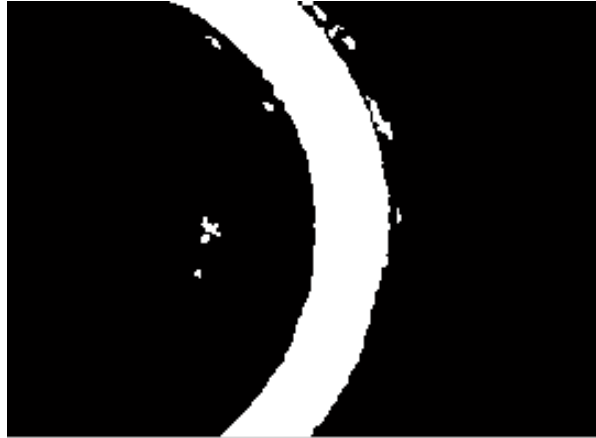


图 3-10 结构元素为 50 时的运算结果



图 3-11 结构元素为 80 时的运算结果



图 3-12 结构元素为 200 时的运算结果



图 3-13 结构元素为 400 时的运算结果

### 3.6 磨痕宽度投影法测量

经过上一节形态学膨胀运算后，磨痕图像从存在噪声的图像转变成磨痕特征区域完全凸显的黑白图像，白色的磨痕区域与黑色背景其他区域完全区分。接下来，运用投影法计算磨痕边界宽度。

#### 3.6.1 规则磨痕宽度的测量

本文提出的投影法计算磨痕边界宽度，原理是将黑白二值图像里白色区域投影到  $X$  轴上，统计每一个  $X$  值对应的在  $Y$  方向上的白点总数。因为磨痕特征区域在二值图像里是白色区域，那么计算每一个  $X$  值对应的  $Y$  方向上的白色像素点总数，在投影量曲线将显示一段峰值，这段峰值所在的区域就是磨痕的宽度。下面先举一个简单的例子来理解投影法测量的原理。如图 3-14，假设磨痕区域是接近于一条直线，我们可以看到，白色区域代表磨痕，黑色区域代表背景，如果我们统计每一个  $X$  值对应的  $Y$  轴方向上的白点数，那么不难想象，投影量曲线在背景区域的  $Y$  值接近于零，在磨痕区域的曲线将会有一段峰值，投影量曲线在磨痕左端将有突变，达到最大值，在磨痕右端也将有突变，减到最小值。那



么这一段突变的宽度就是对应的磨痕宽度，接下来只需要将像素长度转换成实际长度，就会得到所要求的磨痕宽度。



图 3-14 规则磨痕二值图

图 3-14 对应的投影量曲线和投影量曲线对应的微分曲线如图 3-15、3-16 所示。

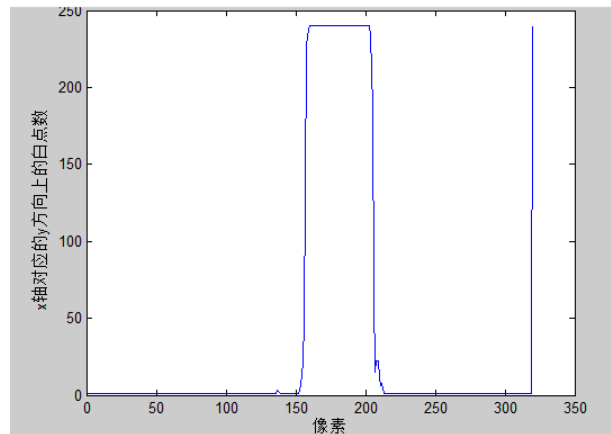


图 3-15 投影量曲线

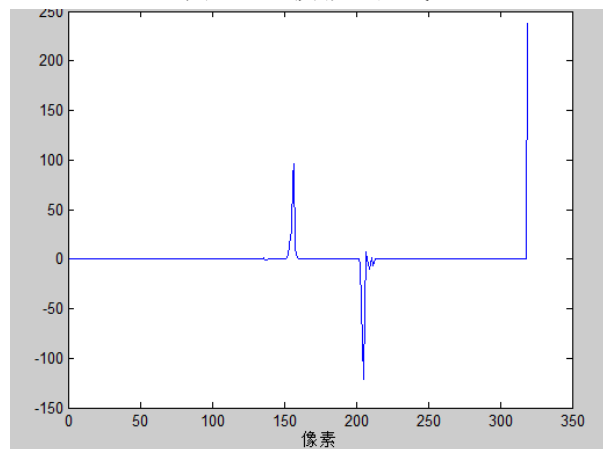


图 3-16 微分曲线

从图 3-15 我们可以看到，投影量曲线在像素 150 附近有一次突变，X 值对应的 Y 方向上的白点总数由接近于 0 上升到 240，在像素 200 附近又有一次突变，X 值对应的 Y 方向上的白点总数由 240 下降到接近于 0。图 3-16 是投影量曲线的微分曲线，根据前面的分析，微分曲线上两个极值之间的像素差就是所要求的磨痕宽度，将微分曲线上的两个极值点的横坐标像素相减，得到的就是磨痕的像素宽度，最后只需要将像素长度换算成实际长度，就得到磨痕的宽度实际值。最后测量得到像素宽度为 48，根据给定的标尺，每个像素的实际长度为 0.1mm，那么磨痕的宽度为 4.8mm。

### 3.6.2 环形磨痕宽度测量

在本节中，以销盘式试验机上环盘式接触式样滑动摩擦产生的环形磨痕为例，介绍投影法的用法。上一节我们经过一系列前期处理得到如图 3-13 所示的二值图像，和图 3-14 所举的例子一样，首先运用投影法将图像中 X 轴方向上每个 X 像素点对应的 Y 方向上的白点数计算出来，投影量曲线如图 3-17 所示，将所得的投影量曲线进行微分处理，可以得到两个极值点，分别是白点最多的点和白点最少的点，微分曲线如图 3-18 所示。

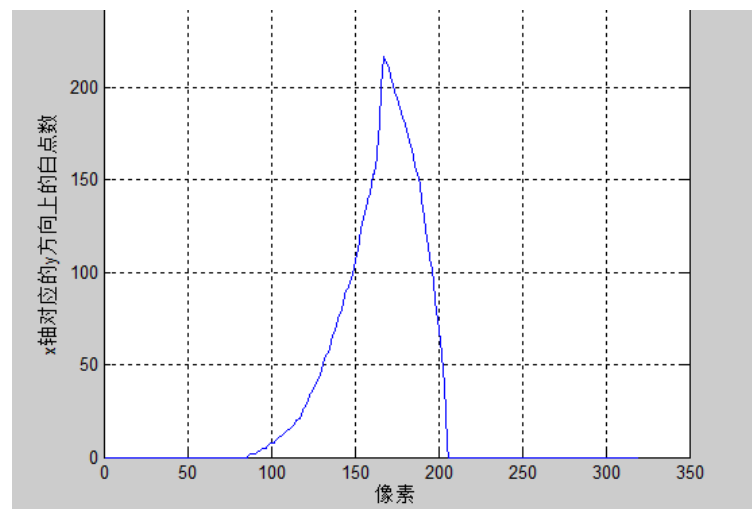


图 3-17 投影量曲线

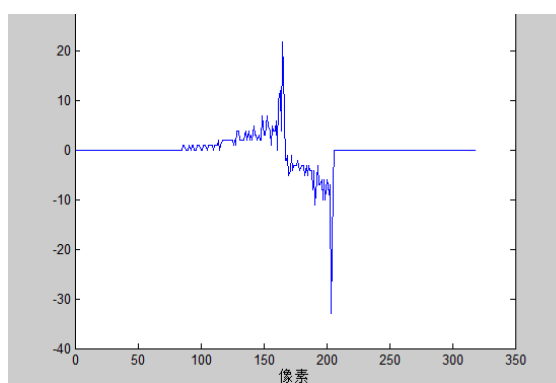


图 3-18 微分曲线

分析图 3-17 投影量曲线，在 0~100 像素内白点数等于 0，100~170 像素内投影量曲线呈现上升趋势，在 X 轴像素点为 170 时达到峰值，之后开始呈现下降趋势，在水平轴 X 像素点达到大约 205 的时候，这时候对应的 Y 方向上白点的像素点总数减少到 0，最后保持平衡。结合图 3-13 二值图像，从左边开始看，由没有白点的背景区域直到白点数渐渐增加，经过磨痕特征区域之后，白点数减少到 0，我们可以确定的是图 3-17 投影量曲线上，白点数从峰值减小到 0 对应的像素点就是磨痕宽度的最右点，即是图 3-13 二值图像对应的白色磨痕特征区域的最右端，将投影量曲线进行微分得到的微分曲线上最小值点就是对应的最右点，到这里，我们已经能够确定磨痕右边界最右点在 X 轴上的像素坐标点。接下来需要得到磨痕左边界的最右点，再结合前面介绍的磨痕接近于直线时计算磨痕宽度的方法，两个点的像素 X 坐标之差，就是磨痕宽度的像素宽度。

为了得到磨痕左边界的最右点的像素 X 坐标，这里首先将图 3-13 取反，将磨痕区域变成黑色，剩余背景变成白色，如图 3-19 所示。

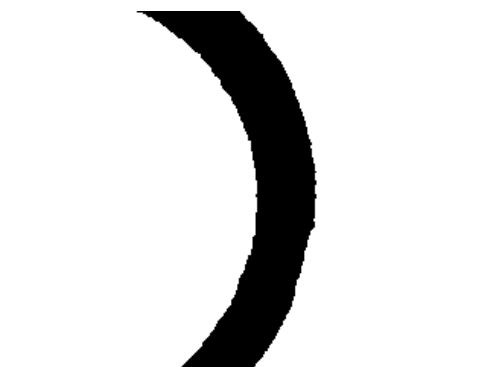


图 3-19 黑白图像取反

将黑白图像进行取反处理之后，原来的磨痕白色特征变成黑色，黑色的背景区域变成白色。然后再使用一次投影法，统计  $X$  轴上每一个  $X$  值对应的  $Y$  方向上的白点总数，投影量曲线如图 3-20 所示，微分曲线如图 3-21 所示。

从图 3-19 可以看到， $X$  轴像素点从 0~100 对应的  $Y$  轴方向上的白点数保持最高点不变，像素点 100~170 对应的  $Y$  轴方向上的白点数开始呈现下降趋势，在 170 达到最小值，之后开始上升又达到峰值保持不变。

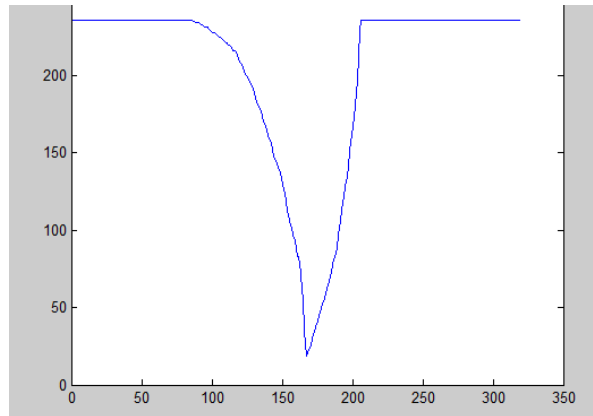


图 3-20 取反之后的投影量曲线

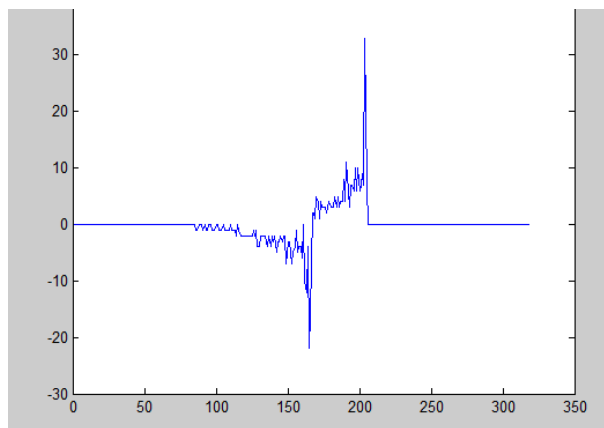


图 3-21 取反之后的微分曲线

结合图 3-19，我们不难看出，对应的  $Y$  轴方向上的白点数达到最小值的点正是磨痕左边边界的最右点，图 3-21 是图 3-20 的微分曲线，曲线上的极小值点就是前面分析的  $Y$  轴方向上的白点数达到最小值的点，即是磨痕左边边界的最右点。结合前面得到的磨痕右边边界最右点，只要计算出两个点的像素差即是要求的磨痕边界宽度。

最后我们得到磨痕边界像素宽度为 39，根据给定的标尺， $DIV=0.1mm*0.1mm$ ，计算得到磨痕的边界宽度为 3.9mm。

### 3.7 磨痕面积的自动测量

测量磨痕的实际面积方法与测量磨痕宽度的原理一样，都是通过像素数来计算。要想计算出磨痕的面积，首先计算出磨痕所在区域的总像素数，之后将像素面积转换成实际面积，即求得磨痕的实际面积。将像素面积转换成实际面积有两种方法：

1. 采集图片的设备提供了标尺，那么根据给定的标尺，我们可以知道每一个像素所代表的实际尺寸，计算实际面积的方法就是将统计的像素个数乘以每一个像素代表的实际尺寸。

2. 如果采集图片的设备没有提供标尺，那么我们可以通过比例关系计算出磨痕的实际面积。如图所示，假设白色椭圆区域为磨痕，整个长方形的实际面积为  $S$ ，所占的像素总数为  $A$ ，白色椭圆所占的像素总数为  $a$ ，要求的白色椭圆面积为  $s$ ，那么根据比例关系：

3-30

其中，磨痕像素面积  $a$  和长方形像素面积  $A$  通过程序得到，长方形实际面积  $S$  通过手工测量得到。这样即可求得磨痕的实际面积  $s$ 。

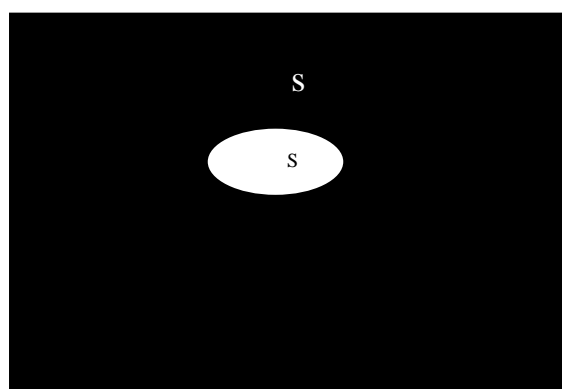


图 3-22 示意图

### 3.8 本章小结

本章主要介绍的是投影法测量磨痕宽度的方法以及磨痕面积的测量方法及原理，详细讲了投影法的概念以及测量原理。本章介绍了在测量之前的图像预处理方法，包括图像灰度化、阈值分割、形态学处理，详细介绍了四种阈值分割方法，通过比较各个阈值分割的结果，选取了一种最合适的阈值分割方法。之后通过形态学处理去除了阈值分割之后存在的噪声小面积，凸显了磨痕特征。详细分析了图像预处理过后运用投影法测量磨痕宽度的方法，并通过求得像素面积而求得了磨痕实际面积。由于投影法在测量过程中不存在人为因素的干扰，因此投影法测量宽度的方法在精确性上高于前面所介绍的标尺法测量，而且投影法还适用于测量形状不规则的磨痕。

## 第 4 章 磨痕测量系统的实现

### 4.1 MATLAB 语言

计算机科学技术快速发展，使得人与机器的交流方式也发生了很大的变化。使用 MATLAB 软件对图像进行处理是目前科技领域的一个必然趋势，图像中的每一个像素对应于 MATLAB 数组中的每一个元素，从上一章指导，图像有两种表现形式，灰度图像和彩色图像，MATLAB 数组元素和像素值是相关的，它们就会形成一个矩阵，其大小和图像相同，MATLAB 具备强大的矩阵计算能力，那么图像处理技术的实现就是依赖于矩阵计算来实现<sup>[30]</sup>。

#### 4.1.1 MATLAB 软件基本介绍

MATLAB (MATrix LABoratory) 又称为矩阵实验室，是一款数学软件，由美国 The MathWorks 公司出品<sup>[31]</sup>。MATLAB 软件的功能很丰富，可以用于算法开发、数值计算、矩阵运算、绘制图形以及创建用户界面等，是一种比较高级的计算机语言。MATLAB 软件还可以和其他的编程软件例如 C, C++ 结合使用。MATLAB 所包含的工具箱 Toolbox 也能够应用于很多领域<sup>[32]</sup>，像 IT 行业的信号处理与通讯，金融行业的金融建模和分析，还有机械行业的控制系统设计与分析等等。MATLAB 包含的配套软件包 Simulink，常用于设计系统、或是将已编译好的系统进行嵌入式开发等方面，它为用户提供了一个可视化开发环境。MATLAB 和 Mathematica、Maple 是数学领域内的知名软件，其中 MATLAB 在数值计算方面首屈一指。

矩阵是 MATLAB 的基本数据单位，与工程中常用的形式的表达指令有异曲同工之妙，相较于 c 语言，运用 MATLAB 来解决各种工程中的计

算问题要更加简单一些。目前，新的版本嵌入了 FORTRAN, C++, JAVA 软件，用户可以通过程序直接调用。

#### 4.1.2 MATLAB 软件特点与优势

MATLAB 软件因为其强大的函数库，使其具有高效的数值计算能力以及符号计算功能，能够减轻用户计算量，简单的程序编辑就可以计算繁杂的数学运算，同时，MATLAB 支持用户对其中包含的函数进行二次开发，用户新编写的应用程序可以添加到工具箱中<sup>[33]</sup>；除了计算功能，MATLAB 软件还具有完备的图形处理功能，用户可以直观的看到编程及计算过程；MATLAB 包含的用户界面易于使用者读懂，它的编译语言和数学公式很相像，用户很容易学会和掌握；而且，像通信工具箱、信号处理工具箱等这些常用的应用工具箱，同样使得用户在使用时更加方便快捷。

MATLAB 软件具有以下七个方面的优势：

a) 编程环境。MATLAB 由一系列工具组成，这些工具包括 MATLAB 桌面、命令窗口、工作空间、路径搜索和用于用户浏览帮助、文件的浏览器，用户可以通过图形用户界面来使用文件和 MATLAB 的函数。现阶段最新版本的 MATLAB 软件本身得到不断升级，用户界面设计更加人性化，操作也更加简单，而且用户还可以使用联机查询功能以及系统帮助，在很大程度上为用户提供了最佳的操作环境[34]。在程序运行过程中，省去了编译这一环节，加快了计算速度，并且可以反馈程序是否出错以及对错误原因进行分析。

b) 简单易用。目前最新版本的 MATLAB 语言与 C++语言大致相同，它是基于 C++语言开发出来的，所以在改进 C++语言的基础上，它的语法特征更加简单，程序表达式更加接近于人们习惯的数学表达式，对于外行的人来说使用起来不是很难。MATLAB 是一种高级的矩阵语言，它包含输入和输出、函数、控制语句、数据结构、和面向对象编程特点。用户可以先编写好一个 M 文件后再一起运行，也可以在命令窗口直接输



入程序。**MATLAB** 能够被广泛应用于科学研究和包含计算的各个领域依赖于它本身的可移植性好、可拓展性极强的特点。

c) 处理能力强。**MATLAB** 内含有各种算法，方便用户解决各个领域内的计算问题，几百个数学函数为大部分的工程提供了强大的基础。经过不断发展，很多工程计算中的最新研究成果都在不断的被添加到**MATLAB** 中，这些算法具有很强的适用性，有时候可以用来代替基本编程软件例如 **C** 和 **C++**，因为如果设定相同的计算要求，优先使用**MATLAB** 的编程将会很大程度上减少用户的工作量。**MATLAB** 包含的函数集内容十分丰富，容易的有比如矩阵，特征向量，相对来说繁琐的有快速傅立叶变换函数<sup>[35]</sup>。函数所能够解决包括求解偏微分方程的组、稀疏矩阵运算、微分方程、求解矩阵运算和线性方程组；初等数学运算、建模动态仿真等。

d) 图形处理。至今为止最新版本的**MATLAB** 在图像处理方面有了很大的提高，比如一般处理软件包含的绘制图像功能，现如今发展的更加完善；像光照不均匀的处理、色彩变换等等一般软件不包含的功能，**MATLAB** 能够独树一帜，同样表现了优秀的变换能力。最早的**MATLAB** 就已经能够将一些数据或是矩阵以图形的形式呈现，也就是使数据可视化，图形也能做标记和输出。更高要求的作图能够应用于科学计算和工程绘图，包括表达式作图、二维图形的可视化、动画和图象处理。有一些像图形对话的特殊的要求，**MATLAB** 也有与之对应的操作，并在不断的创新和完善中，以便保证各个领域用户的要求。此外，应用广泛的图形用户界面功能，在新版本的**MATLAB** 得到了很大的改进，可以满足广大用户的要求。

e) 模块集合工具箱。**MATLAB** 在各个科研领域都发挥了功效，它的工具箱以及模块集作用十分强大<sup>[36]</sup>。用户可以使用这些现有的模块集合工具箱进行学习和比较不同方法的优缺点，它们是由特定领域的高端人才所开发的，所以不要求用户编写相应的代码。目前，**MATLAB** 工具箱应用十分广泛，所涉及的领域不仅有科学研究，还包括工程应用领域<sup>[37]</sup>，比如数学方向的概率统计、概率统计、小波分析；IT 方向的优化算法、

信号处理、数据库接口、DSP 与通讯；控制方向的控制系统设计、非线性控制设计、LMI 控制、鲁棒控制；金融方向的模型预测、金融分析；机电方向的系统辨识、实时快速原型及半物理仿真、嵌入式系统开发、定点仿真、应用数据采集、电力系统仿真；以及地图工具、神经网络、图像处理等，这些都包含于 MATLAB 工具箱。

f) 应用软件开发<sup>[38,39]</sup>。用户在开发软件的时候，可以在开发环境中控制多个 M 文件和图形窗口；在程序编写的时候，可以直接嵌套进入已编好完整的函数，当然也可以使用撤销命令，编写好的程序或是已开发软件，可以直接输出 HDF5，在绘制二维或是三维图形时，如果用户需要对所画图像做相应的解释，可以使用注释和标注功能，以支持对图形的解释。

## 4.2 软件界面总框架

本文所设计的磨损分析测量软件目的是构建一个可视的面向对象的操作界面即系统，主要利用 MATLAB 所提供的图形用户界面 GUI 来实现<sup>[40]</sup>。用户与计算机进行交流是通过已经编写好的程序进行控制，只需要使用鼠标点击系统界面菜单，即可实现所需功能。根据 MATLAB GUI 设计时所遵循的原则建立一个 GUI，主要内容有对象层次结构，控制对象，菜单，和对话框等。设计磨损分析测量软件的各个模块，实现简单的图像处理。设计的软件主要包括文件操作、图像灰度化、阈值分割、数学形态学处理、磨痕宽度测量以及磨痕面积测量六个模块，用户无需一次次编辑程序运行才能得到结果，只需要在界面读入图像，选择所要实现的功能按钮，就可以实现相应的功能。设计的界面总框架图如图 4-2 所示。



图 4-2 总框架图

### 4.3 软件窗口界面设计

本文设计的软件是利用 MATLAB 所提供的 GUI 向导设计控件来完成的，GUI 是 MATLAB 图形用户界面开发环境，是用户与计算机程序之间的交互方式，是用户与计算机进行信息交流的方式，它所包含的一些

工具可以辅助用户开发新的界面，这些工具能够减少用户的工作量，通过图像用户接口，用户只需要点击命令就能够实现功能，所需的程序已经编译好。使用 GUI 版面编辑器，用户根据自己的需要可以将比如坐标轴、文本框等组件放在 GUI 界面里，用来组成一个全新的 GUI。接下来就是设计界面的菜单，通过版面编辑器，还可以改变 GUI 面板尺寸，根据需要调节界面的大小，设置各个菜单的先后顺序，当然也可以设置组件的等级。通过 GUI 设计一个面向对象的可视化的操作界面，回调函数的编写是至关重要的，对界面上存在的每一个功能进行后台回调函数的编写，那么就完成该功能的设计，打包所有功能的回调函数，就构建了一个面向对象的图像处理操作系统。首先需要启动图形用户界面，本文采用在 MATLAB 命令窗口输入 GUIDE 的方法，弹出如图 4-3 的窗口：

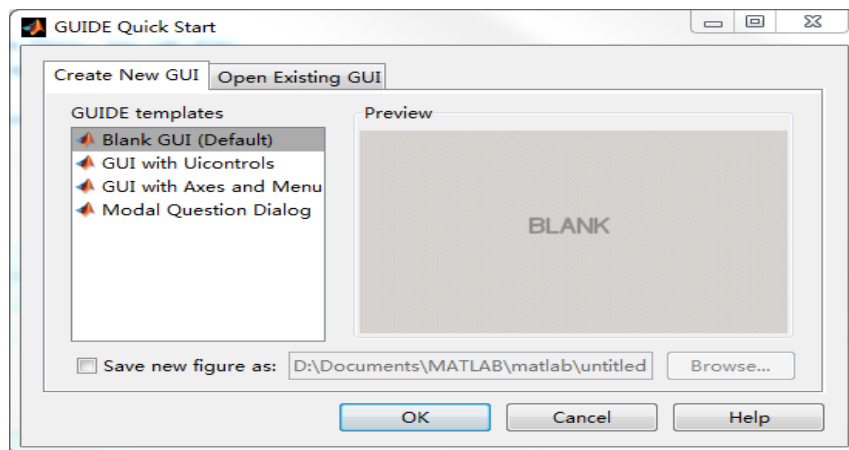


图 4-3 启动 GUI

在弹出的 guide quick start 窗口中选择 create new gui 选项卡里面的 Blank GUI 选项，这样就可以进入图形用户界面来设计系统静态界面，Open Existing GUI 选项是打开已存在的 GUI，本文设计的软件界面如图 4-4 所示：

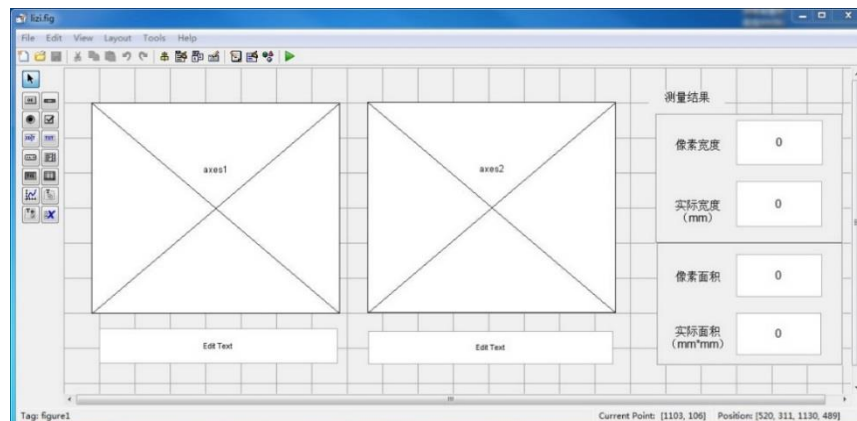


图 4-4 系统界面

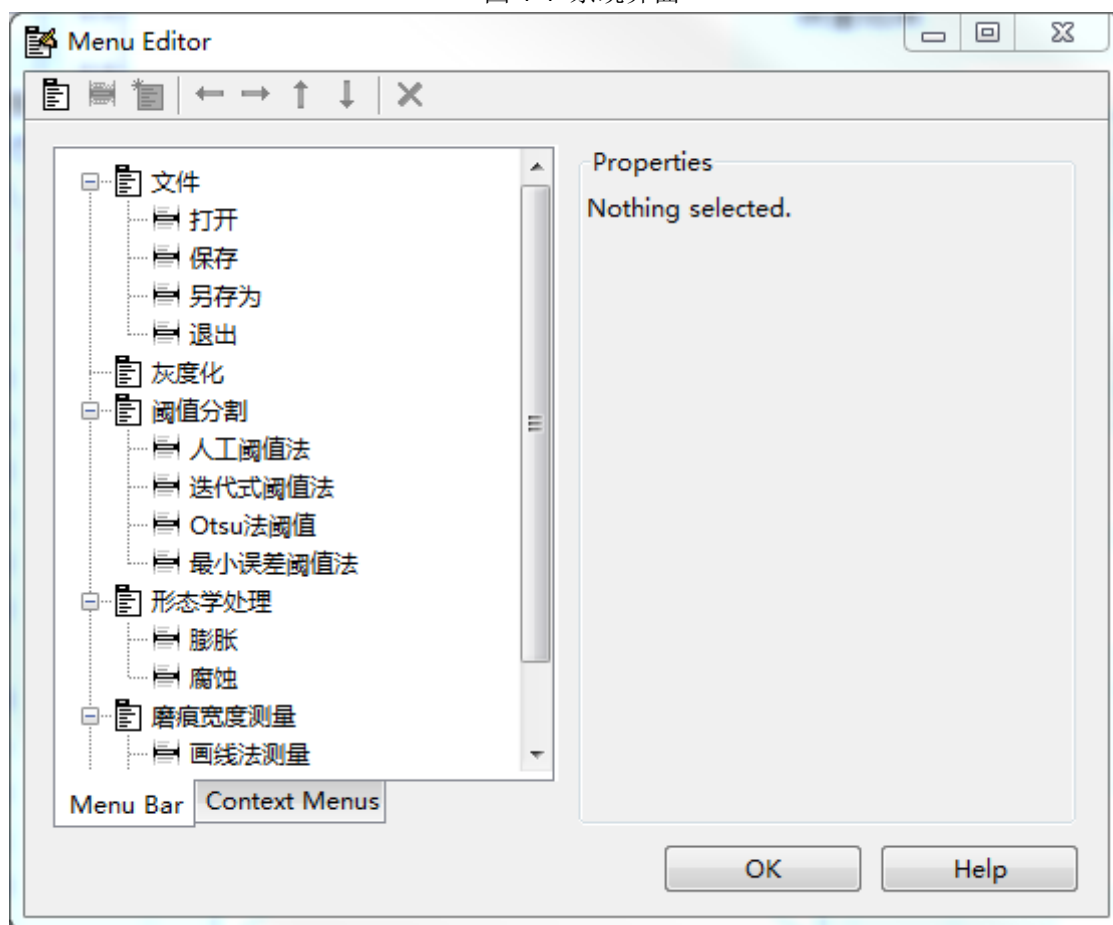


图 4-5 建立系统菜单

其中 axes1 和 axes2 用来显示图像对象, Edit Text 用来显示图像路径, 界面右侧显示测量结果, 分别是宽度测量结果和面积测量结果。本系统实现的主要功能是将测量结果显示在窗口界面, 设置各初始值为 0。设计好界面之后进行保存, GUIDE 会自动生成两个文件, .m 文件和 .fig 文件。Fig 文件是一个二进制文件, 调用窗口界面设计编辑器 file 菜单的 save 选项保存窗口界面图形时会自动生成该文件。

该文件包含所有窗口界面下对象的属性值以及对其所包含的所有后裔的完整描述。可以使用 hgload、open、openfig 命令打开后缀名为 .fig 的文件对对象句柄的保存和引用。M 文件主要是用于控制 GUI 展开时的各种特征, 包含控制函数、为子函数的用户控件回调函数以及 GUI 设计。

M 文件分为两个部分，GUI 初始化和回调函数，用户控件的回调函数的调用方式依据 GUI 与用户的具体交互方式。

设计好系统的界面之后，接下来就需要设计系统的菜单，选择界面上的 Tool 工具栏下拉菜单中的 Menu Editor 选项对系统菜单进行设计，利用 New Menu 按钮来创建新的菜单，根据本文中涉及到的所需要一些基本功能，设计的菜单功能表如下图 4-5 所示。

## 4.4 各个模块的实现

### 4.4.1 文件模块

在文件模块中主要的功能是文件的打开、保存、另存为和退出，其中文件的打开和保存是关键，支持的文件类型有 JPG、PNG、BMP 等。

打开菜单的功能是通过 MATLAB 读取计算机中的文件，运用 `uigetfile()` 标准读盘文件来处理对话框来选择需要打开的图像，在本论文中选择的打开文件类型是 PNG，如果要添加其他类型的打开文件，只需要在程序里添加文件类型即可。程序运行后出现的打开文件选择对话框如图 4-6 所示，接下来就可以选择要打开的目标图像。

文件的保存和文件的打开类似，是通过 MATLAB 提供的 `uiputfile()` 标准写盘文件处理对话框来选择要保存的图像。

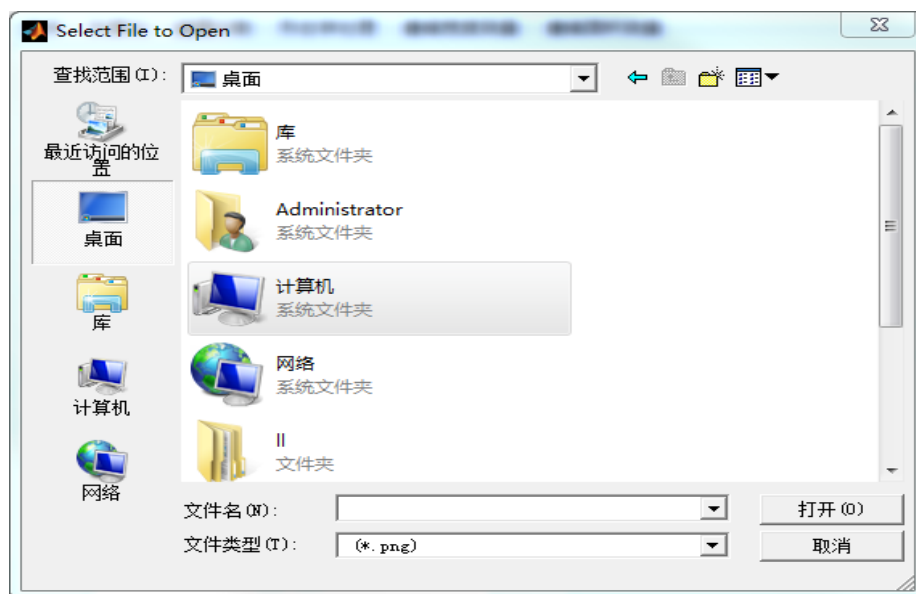


图 4-6 打开文件

#### 4.4.2 灰度化模块

灰度化模块的功能是将打开的原始彩色图像转换成灰度图像，前面介绍过灰度图像的特征，灰度变换可以增大图像的动态范围，扩展图像的对比度，使图像变得清晰，特征变得明显，是一种图像增强简单而且实用的方法。在对图像进行滤波的时候，必须要将图像类型转换为可处理的类型，否则滤波处理的即如果将无意义，所以在后续处理之前，必须将采集到的原始图像转换为灰度图像。本文中打开图像之后对图像进行灰度化处理，结果如图 4-7 所示。

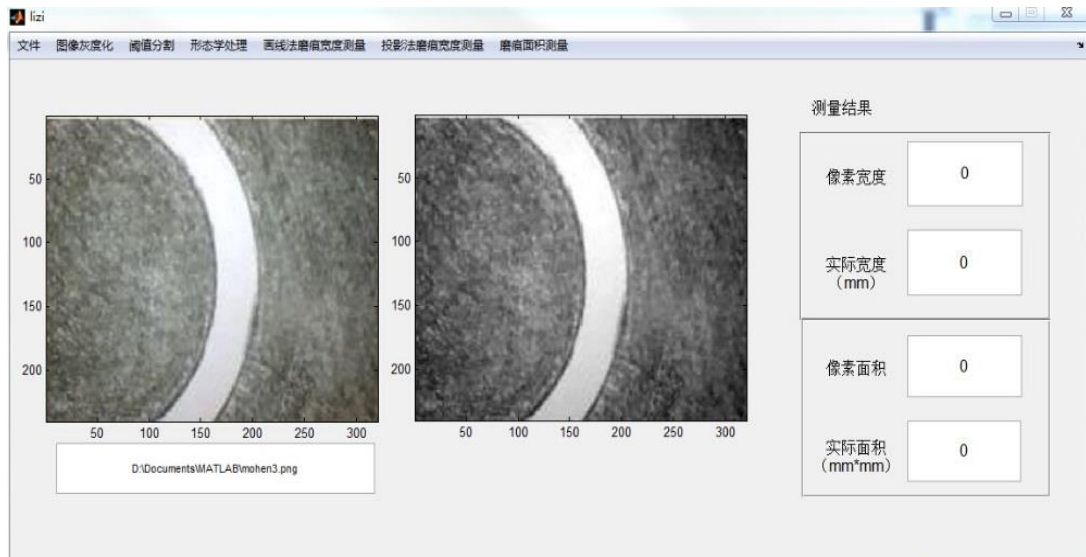


图 4-7 灰度化模块

#### 4.4.3 阈值分割模块

本文中的阈值分割模块包括四个部分，即前面介绍过的人工阈值法、迭代式阈值法、Otsu 法阈值和最小误差阈值法。阈值分割菜单的下拉菜单中包括了四种方法，可以分别选取各个阈值分割方法进行阈值分割，并将阈值分割结果进行对比，最后选取最合适的阈值方法。在本模块中

以人工阈值法和迭代式阈值法为例，介绍其功能的实现，结果如图 4-8 和图 4-9 所示。

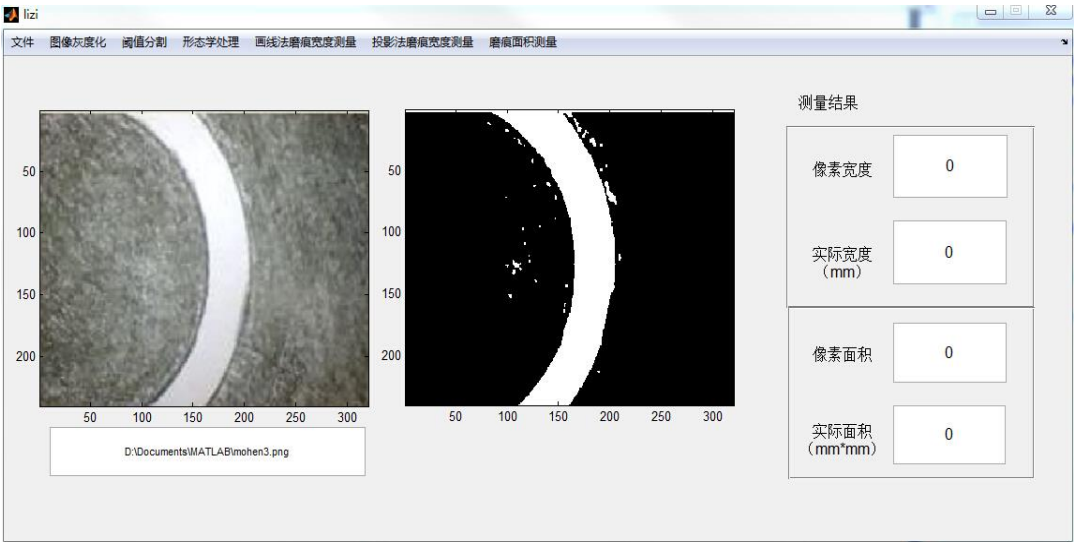


图 4-8 人工阈值结果

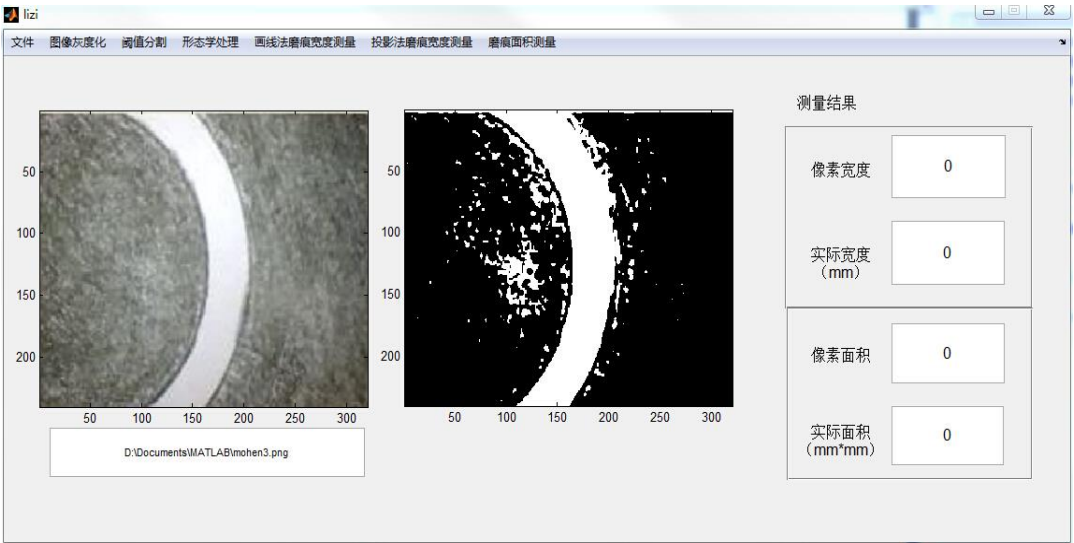


图 4-9 迭代式阈值结果

#### 4.4.4 形态学处理模块



形态学处理模块分为两个部分，腐蚀和膨胀。腐蚀的目的是输出像素值，使得它是输入图像的像素以及周边的像素的最小值，最后达到把图像中边界上的某些像素值删除的效果。膨胀操作和腐蚀操作相反，是输出图像的像素和领域内所有像素的最大值，最后达到给图像中的边界添加像素点。但是要注意的一点是，腐蚀和膨胀并不是互逆运算，腐蚀后再对图像膨胀，或是膨胀后再对图像腐蚀，并不能得到处理之前图像。

在本小节中，膨胀的对象是图 4-8 人工阈值之后的结果，选取了合适的对象结构，进行膨胀操作，结果显示在轴 2 上，如图 4-10 所示。膨胀操作的结果如前面章节所介绍的，将目标图凸显出来，有利于后续测量和计算的准确性。

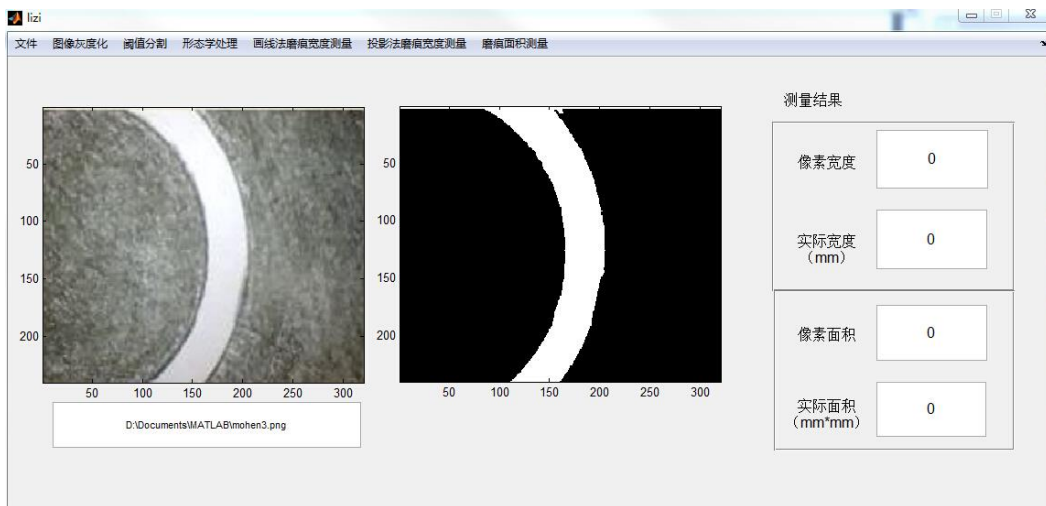


图 4-10 膨胀结果

#### 4.4.5 宽度测量模块

在本文中，宽度测量分为画线法测量和投影法测量，对于画线法测量，本系统实现的功能是在选择测量命令之后，可以在待测量图像上选取两个点连成直线，然后计算出这条直线的长度，并将测量结果显示在系统右侧区域。首先打开要测量的图像，直接选取系统界面上画线法磨痕宽度测量命令，这时会出现十字光标，在图像上选择要测量宽度的两

点，图像上会出现一条直线，这条直线的实际长度值和像素长度值将显示在右侧测量结果区域，如图 4-11 所示。

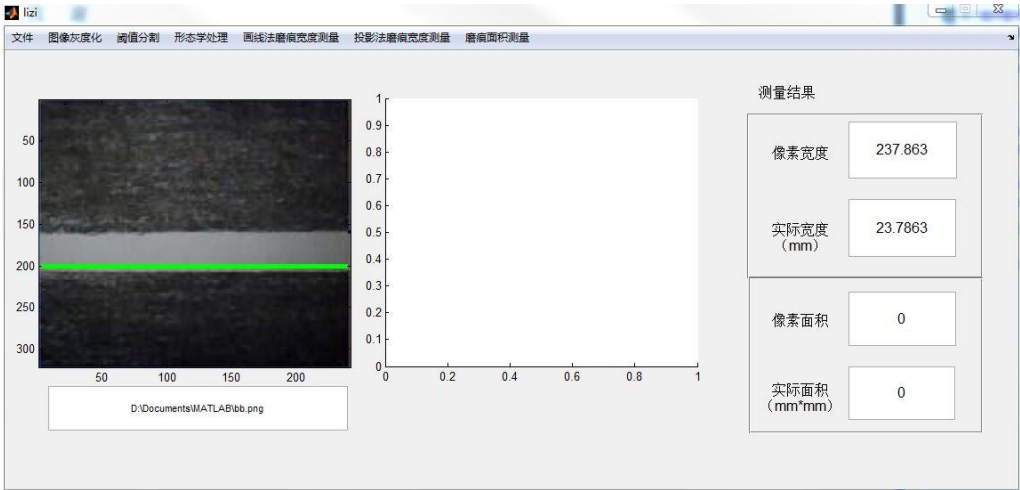


图 4-11 标尺法测量

结果显示，所画直线的像素宽度为 237.863，根据数码显微镜给定的标尺  $DIV=0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}$ ，计算结果为 23.7863mm。

对于投影法测量磨痕宽度，根据前面章节所介绍的图像处理过程，在测量之前，首先将图像进行灰度化、阈值分割、形态学处理，之后再运用投影法测量原理计算磨痕的宽度，结果如图 4-12 所示。

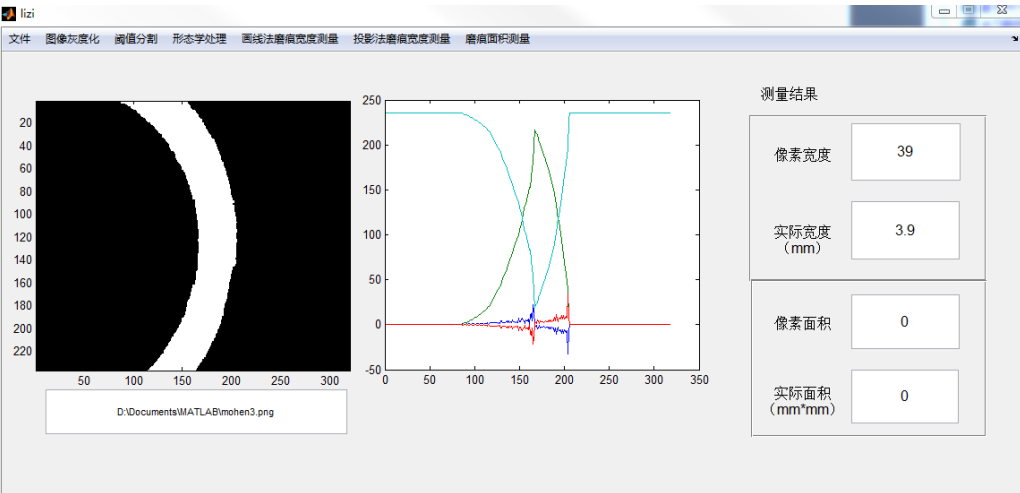


图 4-12 投影法宽度测量示意图

从图中可以看出，左边图像为经过图像处理之后的二值图像，右边图像为投影量曲线和微分曲线，根据前面章节对投影法宽度测量的分析，

从图中可以看到，两条微分曲线各自的最小值对应的即是两条磨痕边界的最右点，将两个最小值对应的像素横坐标相减，得到的就是磨痕宽度的像素宽度值，测量结果显示如图 4-12 所示。

#### 4.4.6 面积测量模块

面积测量模块实现的功能是将测量结果显示在界面的上，如图 4-13 所示，包括磨痕的像素面积和实际面积，每个像素的实际面积乘以像素点个数就是磨痕的实际面积。

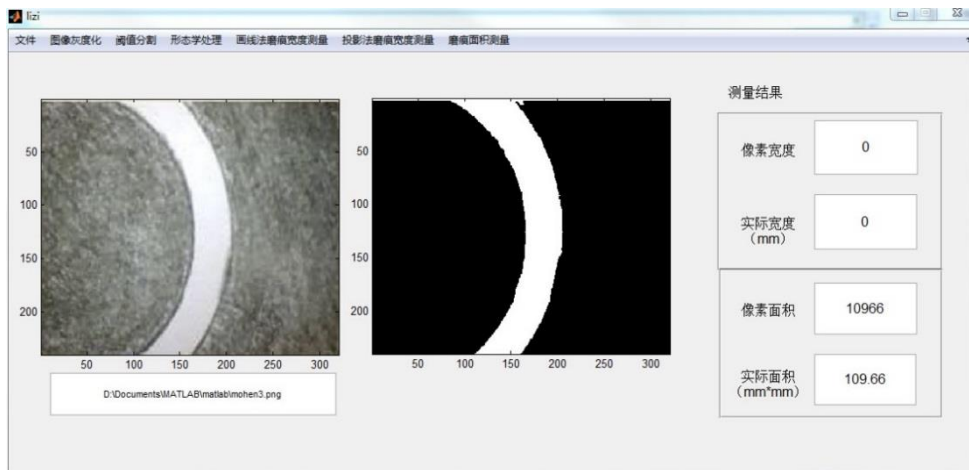


图 4-13 面积测量模块

#### 4.5 投影法在电镀层厚度测定上的应用

从前面的章节我们可以知道，标尺法测量由于人为因素的干扰，比较适合对测量精度要求低的参数测量问题，投影法测量方法测量精度高，不仅适用于宏观测量，也适用于微观测量。投影法不仅能够用于测量磨痕的宽度，也适用于其他领域内的宽度测量问题。比如在摩擦学领域内的零件表面的电镀层厚度的测定。零件表面的电镀层对于零件至关重要，电镀层是否磨损，电镀层厚度是否均匀等问题均严重影响零件使用寿命，

因此，准确测量零件表面电镀层厚度对于判断电镀层是否已损坏十分重要。

采用金相显微镜测量电镀层厚度的方法，适用于电镀层厚度或者是化学保护层厚度大于  $2\mu\text{m}$  的情况。第一步是采集断面图，那么就要参照金相实验时的方法获得所需断面，再依靠显微镜的功能，我们可以得到断面的平均宽度值。如果电镀层的厚度在  $8\mu\text{m}$  以上，这时候的测量值只能用来粗略判断，因为测量误差将超过  $\pm 10\%$ 。如果电镀层厚度在  $25\mu\text{m}$  以上，这时候误差较小。如果电镀层厚度相当薄，那么测量误差将在  $3\%$  以下。显微镜测量的特点是放大倍数越大误差越小，因此我们通常选择将式样放大三倍左右。为了提高测量精度，每一个点至少测量三次。如需要测量平均厚度，则应在镶嵌试样的全部长度内测量 5 个点，然后取平均值。

在一般实验室，由于实验设备的局限性，对于微米级的电镀层厚度测量有时候很难完成，这时候我们就可以将厚度测量问题引入到图像处理上，运用本文提出的投影法测量电镀层厚度。采用显微镜采集电镀层图像，放大倍数为 400 倍，如图 4-14 所示。应用本文构建的磨损分析测量软件测量电镀层厚度，测量结果如图 4-15 所示。

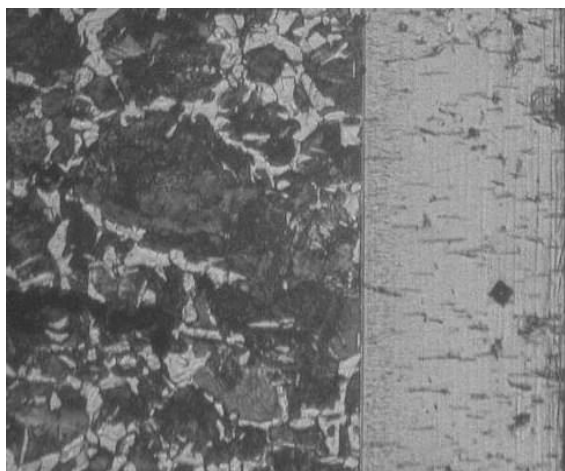


图 4-14 电镀层断面

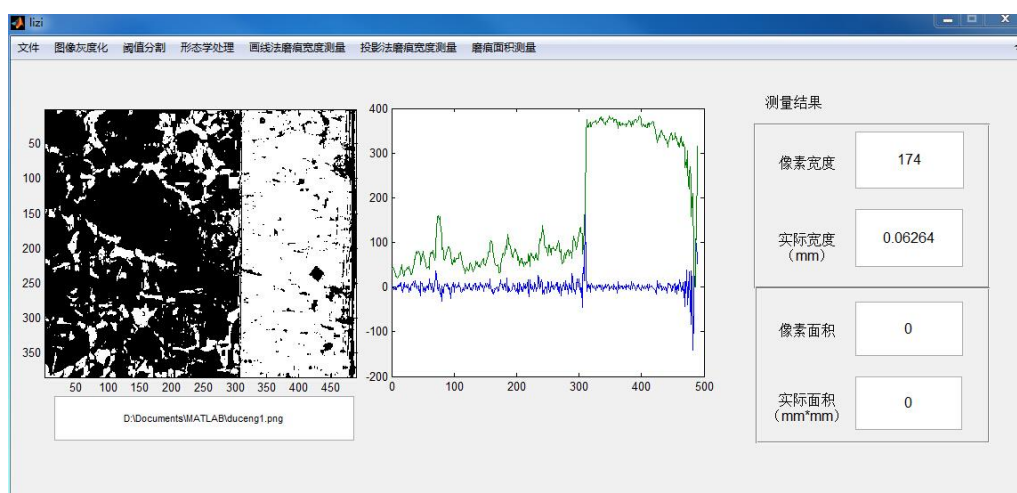


图 4-15 电镀层厚度测量结果图

从图 4-15 可以得到，电镀层厚度为 0.06264mm。这样我们就把一个在有限的实验条件下难以解决的测量问题通过图像处理的方式很好的解决了，也说明了投影法在类似的测量问题上的运用是具有适用性的，本文打包的测量软件在一定程度具有通用性。

#### 4.5 本章小结

本章简单介绍了 MATLAB 及其特点，并根据实现测量功能的需求，打包了磨损磨痕测量软件。详细介绍了建立软件的关键步骤，首先启动 GUI 建立一个新的 GUI，然后在打开的窗口上根据需要设计系统界面，依据界面简洁、使用方便的原则设计用户界面，接下来再为设计好的系统窗口界面建立菜单，根据所要实现的功能添加菜单选项，最后为各个菜单选项添加回调函数，这一步也是最关键的一步，系统功能的实现就在于回调函数的编写。建立磨痕测量软件为磨痕测量提供便利，用户只需要提供测量对象，将对象在软件界面打开，之后便可以在菜单里选择所要实现的功能。



## 第5章 论文总结和展望

### 5.1 总结

本文主要内容是提出了一种测量磨痕宽度的投影法,并基于 MATLAB 打包了磨损测量软件,提供了一个 GUI 平台,实现了磨损磨痕宽度和面积的自动测量。

本文首先简要的介绍了磨损测量在工业上的重要性,以及磨损分析测量的方法和目前国内外研究现状,然后运用标尺法测量磨痕宽度的方法,本文重点提出了投影法测量环盘式接触式样的环状磨痕宽度,对其中运用到的图像处理技术,比如灰度化、阈值分割(人工阈值法、迭代式阈值选择、Otsu 法阈值选择、局部阈值分割)、形态学处理都做了详细论述,并运用 MATLAB 提供的图像处理工具包进行了有关算法的实现,最后运用 GUI 设计了系统界面,方便用户观察和处理图像处理结果。本论文主要研究工作和结论如下:

(1) 阐述了有关磨损测量方法、图像处理的发展和应用,将图像处理技术引入到磨损测量问题上;

(2) 运用标尺法测量磨痕的宽度,为用户提供了一种直观的测量方法,但是标尺法适用于测量宽度均匀的磨痕,无法测量厚度不均的磨痕,而且存在人为因素的干扰,使得测量精度不是很高,;

(3) 设计了在使用投影法测量之前对图像的预处理算法,首先对图像进行灰度化处理,再对图像阈值分割,通过比较不同的阈值分割方法的结果,选取了 Otsu 阈值法得到二值图像,再通过数学形态学处理方法对二值图像中非磨痕的噪声点进行删除,得到突出磨痕的图像。

(4) 提出了一种运用图像的统计性质方法-投影法来测量磨痕的宽度,详细阐述了使用投影法计算宽度的原理并提出了根据图像的像素面积计算实际面积的计算方法。投影法与标尺法相比,能够解决厚度不均的测量问题,测量精度也相对较高;

(5) 运用 MATLAB 提供的图形用户界面 (GUI) 打包了磨损磨痕测量软件, 实现了磨痕参数的快速自动测量, 本软件不仅适用于测量磨痕宽度, 也适用于其他类似的厚度测量问题。

## 5.2 展望

本文详细介绍了画线法和投影法两种测量磨痕宽度的方法, 简单介绍了运用像素计算磨痕面积的方法。在以下几个部分有待改进, 需要进行进一步的研究:

(1) 本文运用 MATLAB 提供的 GUI 构建了测量系统, 实现了自动测量功能, 但是目前所设计的界面相对简洁, 要想实现更加全面的功能, 系统需要进一步改进。

(2) 本文研究内容集中在测量环盘式接触式样上存在的环形磨痕的宽度和面积参数, 实际上销盘试验机的对象多样化, 对于其他种类的磨痕测量, 虽然理论上可以采用投影法测量, 但是具体的算法问题有待研究。

(3) 磨损是十分复杂的现象, 如果想要准确的衡量式样的磨损程度, 就要求测量出磨痕的深度, 获取磨痕深度涉及到精确的测量仪器, 深度的测量问题涉及到二维图像向三维图像的转化, 这就要求图像处理技术的深入发展, 磨痕深度的测量和磨损状态的三维呈现在图像处理技术领域是很有价值的。



## 参考文献

- [1] 雒建斌, 李津津. 摩擦学的进展和未来[J]. 润滑与密封, 2012 (12): 32~34
- [2] 刘佐民, 高万振等. 摩擦学在湖北的研究与工业应用[J]. 第二届全国工业摩擦学大会暨第七届全国青年摩擦学学术会议会议论文集[C]. 2004
- [3] 田晓. 陶瓷材料摩擦副的摩擦磨损特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [4] 田捷, 沙飞, 张新生. 实用图像分析与处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995: 85~90
- [5] 张远鹏, 董海, 周文灵. 计算机图像处理技术基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1996: 165~167
- [6] 田晓. 陶瓷材料摩擦副的摩擦磨损特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2003
- [7] 贾永红. 数字图像处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社: 2003: 16
- [8] 颜发根, 刘建群, 陈新, 等. 机器视觉及其在制造业中的应用[J]. 机械制造, 2004(11): 28-30
- [9] 姚忠斌. 机械零件的磨损规律与预测[J]. 铁道技术监督, 2005, (12): 11~12
- [10] Guifang Duan, Yen-Wei Chen, al et. Automatic optical flank wear measurement of microdrills using level set for cutting plane segmentation[J]. Machine Vision and Applications. 2010, 21(5): 67~69
- [11] Theo Mang. Continuous Wear Measurement Technique[J]. Springer Berlin Heidelberg. 2014, 15(3): 313
- [12] Bertram, Gunnar Flivik, al et. A New Method to Make 2-D Wear Measurements Less Sensitive to Projection Differences of Cemented



- THAs [J]. Clinical Orthopaedics and Related Research. 2008, 466(3): 684~690
- [13] R.W.Smith, M.Jech. Sub-micron wear measurement using activities under the free handling limit[J]. Springer Netherlands. 2012, 292(3): 1147~1152
- [14] Du Jian jun, Zhang Shao jian. Novel auto-regressive measurement of diamond tool wear in ultra-precision raster milling [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012, 13(9): 1661~1670
- [15] Karl Knahr. Comparative In Vivo Wear Measurement of Conventional and Modern Bearing Surfaces in Total Hip Replacements by the Use of POLYWARE Computerized System [J]. Tribology in Total Hip Arthroplasty. 2011: 217~228
- [16] Zou Qian, Kong Fanrong. Wen Shizhu. A new method of measuring the film thickness of mixed lubrication in line contacts [J]. Trih Trans. 1995, 38(4): 869~874
- [17] 刘维民, 郭志光. 形色各异的摩擦磨损与润滑研究[J]. 自然杂志. 2014, 12(4): 35~41
- [18] 严志军, 朱新河. 基于光干涉技术的薄膜润滑特性研究[D]. 大连海事大学. 2012
- [19] 严新平, 袁成清, 白秀琴, 等. 绿色船舶的摩擦学研究现状与进展[J]. 摩擦学学报, 2012, 21(4), 20~26
- [20] Theo Mang. RNT Wear Measurement Technique [J]. Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. 2014: 1590
- [21] Z.Y.Hu, D.L.Duan S.Li et al. Pure Mechanical Wear Measurement of Carbon Steel in Oil–Water Fluids [J]. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion . 2015, 21(3): 1~17

- [22] Kwon S, Hwang J. Kinematics, pattern recognition, and motion control of mask-panel alignment system [J]. Control Engineering Practice, 2011(11): 883~89

- [23] 王新成. 高级图像处理技术[M]. 中国科学技术出版社,2001:155~157
- [24] 程研. 基于视频图像处理技术的运动车辆检测与跟踪算法研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2010
- [25] 张丽飞, 王东峰, 时永刚, 等. 基于形变模型的图像分割技术综述[J]. 电子与信息学报, 2003, 25 (3) : 395~403
- [26] Kenneth R.Castleman. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社. 2011: 223~225
- [27] J. Z. Liu and W. Q. Li. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional Otsu method [J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(1): 101~105.
- [28] Liu C, Liu J, Wu J, et al. High Precision Embedded Control of a High Acceleration Positioning System[C]. 5th International Conference, ICIRA, 2012: 551~560
- [29] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 4~6
- [30] Castleman K R. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 1~8.
- [31] 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 190~193
- [32] 李了了, 邓善熙. MATLAB 在图像处理技术方面的应用[J]. 微计算机信息, 2003, 19(2): 65~67
- [33] 周广芬, 李鹏, 杨久义. 利用 MATLAB 图像处理工具箱进行图形数字化的研究[J]. 河北科技大学学报. 2005, 26 (4): 309~311
- [34] 贺兴华, 周媛媛, 王继阳, 等. MATLAB7. 0 图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 14~16
- [35] Wang Yaoming, Zhang Gang. ZC and BT Recognition Arithmetic Based on Radon Transform for Planar Images[J]. Electronics Journal, 2001, 29 (10): 1512~1517
- [36] Wang Yaotning, Wang Hao. Radon Transform and its Application to Image Recognition[J]. Journal of shanghai university of Electric Power, 2005, 8 (5): 6~1



- [37] 马明建. 数据采集与处理技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 42~45
- [38] 田敏, 李江全, 邓洪涛. MATLAB 典型控制应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 35 ~44
- [39] Paulo S.R.Diniz, Eduardo A.B.da Silva. Digital Signal Processing System Analysis and Design[M].Publishing House of Electronics Industry, 2004: 13~20, 107~125
- [40] Shan Shai Jan, Wy ant Chan, et al. MATLAB Algorithm Availability Simulation Tool [J]. Springer Verlag. 2009, 13(4): 327~332





## 攻读硕士期间已发表的论文

### (一) 发表论文:

- (1) 秦襄培, 刘莉, 等. 镀层厚度的自动测定[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37 (1): 64~66





## 致 谢

两年的研究生生活很快就要结束了，这两年的时间带给我的收获将是我终生难忘的。

本论文是在我的研究生导师秦襄培老师的悉心指导下完成的，在我攻读硕士研究生期间，秦老师给了我极大的帮助，不管是学习上还是生活上，只要是为我们好的，秦老师都考虑的很周到。秦老师有着严谨的治学态度、渊博的学识，常常能够及时的为我们解决难题，让我最有感触的还是秦老师的平易近人，让我们和他接触起来没有距离感。关于我的毕业论文的选题、研究和学术论文的写作，秦老师都给予了悉心的指导，在整个过程中给我提了很多宝贵的意见，这些都将对我以后的学习和工作影响深远。

同时还要感谢实验室的师姐郭亚娟，师妹吴丽，还有和我同届的鄢宁波同学。在我的两年学习期间，他们常常耐心的开导我，为我排忧解难，我们一起快乐的学习快乐的生活，非常感谢这两年的陪伴，让我的研究生生活丰富多彩。还有很多研究生同班同学也给予过我很多帮助，真心的谢谢你们。

最后也要感谢我亲爱的家人，他们从来没有给过我压力，让我能够心无旁骛的享受校园时光，他们是最坚实的依靠。再次向所有给过我帮助和关心的老师、同学、家人表达最衷心的感谢，愿你们未来一切安好。

