

摘 要

通过对高压开关进行机械特性测试试验,可判定高压开关动作的可靠性。针对高压开关机械特性测试中夹具和传感器安装复杂问题,在分析图像测量技术非接触优点和机械参数测试特点的基础上,提出一种高压开关机械特性测试的新方法。由计算机向高压开关发送启动信号,同时信号采集设备高速获取高压开关操作过程中图像和电信号等有效信息,然后计算机对采集数据进行分析、计算和处理,并采用人工智能技术提高图像识别的准确率。最后进行了模拟现场实验证明,利用本文的算法,高压开关同期和行程等参数能够得到较为准确的测量。

关键字: 高压开关 机械特性测试 图像测量 神经网络

ABSTRACT

It can judge the operation reliably of the high-voltage (HV) circuit breaker base on the mechanical characteristics test experiment for the HV circuit breaker. Aimed at the problem of the complexity of the clamp and the sensor installation in high-voltage circuit breaker mechanical characteristics test experiment, we presented a kind of new method of HV circuit breaker mechanical characteristics test, based on the analysis of the advantage of the image measuring technology non-contact and the feature of the mechanical parameter characteristics. First the test system sends a starting signal to the HV circuit breaker; meanwhile the signal collecting equipment obtains the HV circuit breaker's useful information quickly. Secondary the computer analyzes, calculates and processes the data collected. The accuracy of the image recognition is increased by using the artificial intelligence technique. At last we simulated the scene experiment, the experiment proved that the synchronism and the stroke mechanical characteristics parameters of the HV circuit breaker can be measured accurately.

Zhao Chenguang (Electrical engineering theory and new technology)

Directed by assprof. Zhao Shutao

KEY WORDS: HV circuit breaker , mechanical characteristics test , image measurement, Neural Network

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于图像测量技术的高压开关机械特性测试方法研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：_____日 期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名：_____

导师签名：_____

日 期：_____

日 期：_____

第一章 引言

1.1 课题的提出及研究意义

随着电力系统规模的不断扩大以及电力控制技术的更加深化,各种高压开关等通断电控制器件越来越被广泛的应用。电力系统正常运行时,用它来进行倒换运行方式,把设备或线路接入电路或退出运行,起控制作用;当电气设备或线路发生故障时,断路器用来快速切除故障,保证无故障部分正常运行,起保护作用。可见,在操作分合闸,重要负荷的开断中高压开关发挥着极其重要的作用^[1]。

当电力系统出现异常情况时,高压开关的拒动、误动、慢分和三相严重不同期等机械故障都可能造成恶性事故,甚至可以引起设备爆炸,给电力系统的稳定和国家财产带来不利和损失。大量统计数据表明,高压开关事故的80%左右是由机械故障造成^[2,3]。

鉴于高压开关在电力系统中的重要性,保证其稳定准确的开、合动作,对保障用电系统的安全稳定运行有着重大意义。因此,对高压开关的机械特性进行测试,了解高压开关的各种参数是否正常,从而进行及时的维护和检修显得尤为重要。其中,机械试验包括机械特性试验、机械操作试验、机械寿命试验和接线端子静拉力试验,本文研究与机械特性相关的试验方法。主要参数包括:分(合)闸同期性、分-合闸时间、刚分(刚合)速度、行程、超行程、分(合)闸速度等参数。高压开关的速度与时间特性的测量是鉴定高压开关调整安装或检修质量的重要指标^[8]。

随着真空断路器、真空接触器等高操作次数、产品产量的与日俱增,对测试装置提出了更高的要求。现场测试过程往往时间紧、任务重,而不同型号高压开关外形尺寸不同,测试需要的夹具不同,现场安装传感器是一项繁琐任务,不仅安装耗时费力,一旦安装不紧还可能造成测试数据的不准确。因此,测试系统的自动化程度和测试传感器的安装和一直是影响工作效率的主要因素。深入研究高压开关测试机理,找到通用性强、测量精度的测试新方法一直是现场工作人员和学者研究的热点问题。

1.2 国内外研究动态

1.2.1 高压开关机械特性测试研究现状

高压开关在安装投入或检修后,为保证其安全运行,按规程要求必须进行机械特性参数测试。参照中华人民共和国国家标准常温下的机械试验 GB3309-89,本标准参照采用国际标准 IEC56《交流高压断路器》、IEC129《交流高压隔离开关和

接地开关》，规定了高压开关设备常温下得机械特性试验方法。其中参数包括：分闸时间、合闸时间、分合闸同期性、合闸同期性、开距、超程、刚分(合)速度、平均速度和最大速度等。

在早期的传统的测试方法中，检修试验人员使用电秒表、同步灯、光线示波器、电磁振荡器和转鼓测速仪等进行测试。这些设备携带不方便，而且这些方法不但占用现场面积大，测试时接线复杂，读取记录的数据要进行人工处理和计算，测量的误差大，检修工作的时间长。80年代末90年代初，通过模拟数字电路技术的运用，先后研制投产了集箱式断路器机械特性测试仪。这类仪器综合了上述部分仪表的测量功能，简化了试验接线和操作，且有携带方便等优点。但它仍然采用传统的技术和试验方法，由可控硅直流电源测速器控制电路、门控电路及计时显示电路和同期灯等部分组成，存在自动化程度低、测量误差大和功能不强等缺点。而且，随着电力事业的发展，输电线路电压越来越高，高压开关每一相的断口数也相应增加，这类断路器机械特性测试仪只可同时测量四个断口，已不能满足110kV以上的高压开关的测量要求^[2]。

随着微电子技术的发展及微机技术在国内外的广泛应用，90年代开始出现微型高压开关机械特性测试仪。国外在这方面的研究较早，目前已有功能齐全、抗干扰性能高的成熟产品，如美国 DOBLE 公司开发研制的 TR-3000 型数字式断路器试验系统。国内先是出现了以 Z-80 单板机作微处理器的产品，继而出现了以 8031 单片机作微处理器的产品，现在也有的采用 8098 或 INTEL80C196 单片机作微处理器。以 Z-80 单板机作微处理器的微机系统测速误差大、导电杆总行程和导电杆超行程测量精度低、达不到对速度、行程、超行程的测量精度。因此，随着 MCS-51 系列单片机的出现而逐渐被淘汰。

虽然以各种传感器作为行程传感器的微型高压开关特性测量仪，测量精度较以前有较大提高，而且大大提高了系统的自动化程度。但是，尽管某些传感器本身的精度较高，但是仍然没能解决传感器的夹具安装复杂的难题。传感器的夹具安装耗时长，不同开关需要更换不同夹具，浪费了人力、物力和时间，造成效率低下。并且传感器的精度不同和仪器中电子元件的差异，也会造成测量的开关速度有较大差异。在使用前检修试验人员必须仔细阅读使用说明，但即使这样，往往在变电站现场中还会出现因检修试验人员接线或使用不当而致使测量出错或仪器损坏的情况，因此仍需研究测试方法的自动化，进一步改进现场高压开关测试仪^[1-3]。

1.2.2 图像测量技术及其在测试领域应用的现状

图像测量技术是在二十世纪八十年代后期，随着计算机技术的发展而开拓出来的一个新的计算机应用领域。图像测量就是利用计算机及其它有关数字技术，对图

像进行预处理、分析和运算，从而达到某种特定的测量目的。

图像测量技术是以现代光学为基础，融光电子学、计算机图像学、信息处理、计算机视觉等科学技术为一体的现代测量技术。图像测量就是测量被测对象时，把图像当作检测和传递信息的手段或载体加以利用的测量方法，其目的是从图像中提取有用的信号。作为一种重要的非接触测量方法，它已经广泛地应用到外观检测、工业监测、生物医学等领域^[17-19]。

图像测量技术具有再现性好、精度高、适用面宽、可压缩性好等特点。基于图像的检测系统已经在其他领域取得了一定成果，如文字识别、指纹识别、人脸识别、产品检测、军事侦察等。在电力系统中，采用数字图像测量技术的电站锅炉火焰图像检测系统也已经设计成功。目前采用图像测量技术的高压开关机械特性测试方法及装置，在国内公开发表的文献中鲜有报道。因此将图像技术引入到高压开关机械特性测试有很大实际意义。

1.2.3 利用图像测量技术进行测量的特点

图像测量技术无论从测量方法、原理、准确度、效率和适用的邻域范围都具有巨大优势，并且越来越广泛地用于众多科学与工程领域，其特点如下：

- 1) 与被测量的对象无接触。高压开关机械特性测试系统对测量对象不会产生任何损伤，安全可靠，这是其他测量方式无法比拟的。
- 2) 提高测量的精度。测试系统利用对图像中目标物进行识别和定位的方法，可以明显地提高图像目标的定位精度。
- 3) 可测量传统方法不易测量的物理量。许多肉眼无法分辨的物理量都可以利用图像测量技术来实现。动触头在几毫秒内完成位移，单凭人眼是无法完成测量任务。利用图像测量技术也可以通过采集图像进而完成后期图像的分析与研究。
- 4) 自动化程度高。随着计算机技术的不断发展，各类图像采集、处理硬件与软件的出现为图像测量技术提供了新的方法和手段，再加上处理算法自动化程度和效率的提高，使得该技术处理分析的自动化程度大大提高，这样极大地减少了处理的工作量和时间。

为了实现高压开关机械特性测试测试过程的自动化和准确性，本文引入图像测量领域的研究方法和成果，尝试完成断路器的机械特性参数的测量工作^[2,5]。

1.3 本课题的主要研究工作

针对现有测试方法中安装夹具的复杂、耗时长、效率低下等问题，主要研究基于图像测量技术的非接触式高压开关机械特性测试方法。利用 CCD 工业摄像机替

代传统的传感器，通过计算机对高压开关联动部分运动轨迹的图像以及所采集的电信号进行分析，计算出所测的高压开关机械参数。课题围绕着高压开关行程测试技术的几个关键问题进行研究，将要完成的工作主要包括：

- (1) 将图像测量技术、信号处理理论及人工智能技术应用于高压开关的特性测试，由图像捕捉单元、状态参数采集单元和计算机识别控制系统初步组成一个闭环测试系统。
- (2) 三相触头分(合)闸同期性的检测。在高压开关分(合)动作时一次性检测数据,对高压开关不同期性主要测试固有合(分)闸时间、初始时间、等参数。最后根据机械特性参数检测高压开关三相不同期性。
- (3) 图像处理和分析。利用图像处理技术，对采集到的图像进行处理，消除图像中无关的信息，恢复有用的真实信息，增强有关信息的可检测性和最大限度地简化数据。
- (4) 触头运动图像识别和定位。利用神经网络技术，对处理后的图像中能反应动触头运动特性的螺栓进行目标的识别和定位。识别图像中有效信息，并在各幅图像中对螺栓进行定位。而后根据定位得到的像素坐标计算机特性各参数。

第二章 测试系统的总体设计和开发平台的选择

进行高压开关机械特性参数测试，首先需了解高压开关的工作原理，分析目前其主要机械特性参数的测量方法。利用图像测量技术替代传统测量方法，由计算机对高压开关联动部分运动轨迹的图像处理、分析和计算，可实现基于图像测量技术的非接触式断路器行程参数测试。

2.1 高压开关操作过程及机械特性参数

本文以真空断路器为例，首先介绍断路器的结构和操作过程。

真空断路器是利用真空作为触头间的绝缘和灭弧介质的断路器。它是高压开关中的一种，主要由真空灭弧室和操动机构通过绝缘导杆和支持杆组成一体。如图 2-1 所示。由导电夹、软连接、出线板等经过灭弧室两端的动、静导电杆组成高压载流回路，下部由底座、合闸电磁铁、分闸电磁铁、合闸构件、分闸弹簧、辅助开关等组成。

动、静触头均密封在真空灭弧室内，操动机构通过绝缘拉杆、触头弹簧等同真空灭弧室内的动导电杆相连，由断路器主轴通过三根绝缘拉杆把力传导给动导电杆，动导电杆带动动触头与静触头同时接通、分断，完成合/分闸动作。

当操动机构的合闸线圈通电，合闸电磁铁被吸合，带动动导电杆运动，使动、静触头接通，完成合闸过程；当操动机构的分闸线圈通电，分闸电磁铁被吸合，从而使锁扣释放，在分闸弹簧以及本身重力作用下迅速分闸，完成分闸过程。

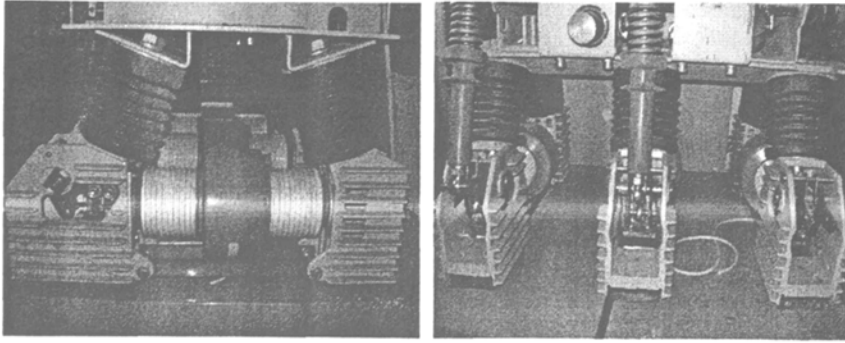
真空断路器的合、分闸操作过程：

合闸时，操动机构合闸线圈得电→合闸铁芯动作→机构及传动连杆动作→开关主轴转动→绝缘推杆前推→三角拐臂转动→下压触头弹簧装置→灭弧室动导电杆向下运动使触头接触→触头弹簧压缩至接触行程终点。与此同时，机构的辅助开关切断会闸接触器线圈电源，分闸弹簧拉长贮能，电磁机构的扣板由半轴扣车保持在合闸位置，合闸结束。

分闸时，机构中的分闸线圈得电→分闸铁芯动作→扣板与半轴脱扣→断路器在触头弹簧和分闸弹簧的作用下迅速分断→机构的辅助开关切断分闸线圈电源→机构复原，并由分闸弹簧保持在分闸位置^[8]。

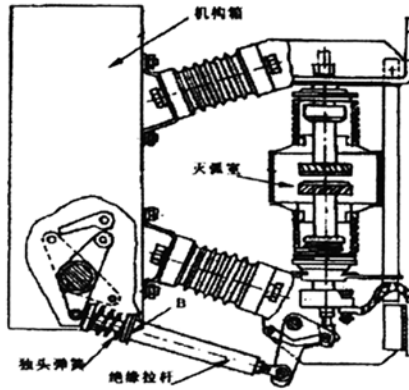
真空断路器的机械特性参数是保证断路器正常工作的重要依据。可以从真空断路器的行程—时间曲线来定义和计算断路器的机械特性参数。在合闸时，动触头迅速移动，并接触静触头，使真空断路器导通，接入负载。但由于动触头存在惯性，

还会运动到最高点，而后返回到平衡点，形成一个振荡过程。因此，在曲线中存在一个超调的过程。如图 2-2 所示定义断路器的机械特性参数。



(a) 断路器侧视图

(b) 断路器后视图



(c) 真空断路器外型图(侧面)

图 2-1 真空断路器

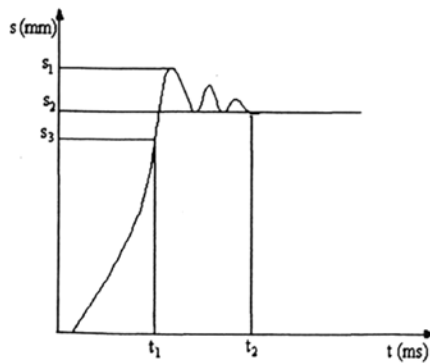


图2-2真空断路器行程—时间曲线

(1) 触头开距:在合闸开始时，动、静触头之间的距离。

$$s = s_3$$

(2-1)

(2) 超程:动静触头开始接触起至合闸结束之间的距离。

$$s = s_2 - s_3 \quad (2-2)$$

(3) 刚合速度:动触头在合闸过程中与静触头刚接触时的速度。

$$v = \frac{s_3}{t_1} \quad (2-3)$$

(4) 合闸速度:动触头在合闸全过程中的速度。

$$v = \frac{s_2}{t_2} \quad (2-4)$$

(5) 合闸时间:是指断路器在合闸过程中,动静触头相接触瞬间的时间。

$$t = t_1 \quad (2-5)$$

(6) 弹跳时间:在合闸过程中动静触头接触后由于弹力,再经过反复弹跳后最终达到稳定的这段时间。

$$t = t_2 - t_1 \quad (2-6)$$

(7) 分闸速度:动触头在分闸全过程中的速度。

(8) 分闸时间:动触头在分闸全过程中动作的时间。

(9) 刚分速度:动触头在分闸过程中与静触头刚分离时的速度。

(10) 三相不同期性:在合闸、分闸过程中由于三相触头不可能同时完成接触,总存在一定的时间差,称为三相不同期性。

由此看出,在真空断路器的机械特性参数测试中,主要检测的参数是动触头的行程,从真空断路器的行程—时间曲线才能定义和计算其它机械特性参数^[2,7]。

2.2 常用机械性能测试方法

高压断路器频繁的动作以及过度的拆卸检修,都会降低断路器的动作可靠性。当断路器的零件或部件经过多次动作和物理磨损时,断路器的机械特性就会发生一定的变化。断路器机械特性的安全,是判断断路器能否可靠运行的重要因素,其速度与时间特性的测量是鉴定断路器调整安装或检修质量的重要指标。

高压开关设备的机械运动特性测量的主要内容是通过对设备动作时一些相关

机械特性参数进行测量和分析，来确定高压开关动作的准确性和正确性。为此，首先需完成各个机械参数的测量，进而研究各个参数与标准数据的差异，从中分析得出高压开关运行状况的信息。

目前多数针对高压断路器机械性能的检测，主要是在备交接及停电期间结合检修定期进行预防性试，从而进行更换部件和进行操作机构的机械特性查。

- 1) 早期传统的测试方法中，检修试验人员使用电秒表、同步灯、光线示波器、电磁振荡器和转鼓测速仪等进行测试。这些设备运输困难，而且这些方法不但占用现场面积大，测试时接线复杂，读取记录的数据要进行人工处理和计算，而且测量的误差大，检修工作的时间长。
- 2) 通过模拟数字电路技术的运用，研制投产了集箱式断路器机械特性测试仪。这类仪器综合了上述部分仪表的测量功能，简化了试验接线和操作，且有携带方便等优点。但它仍然采用传统的技术和试验方法，由可控硅直流电源测速器控制电路、门控电路及计时显示电路和同期灯等部分组成，存在自动化程度低、测量误差大和功能不强等缺点。
- 3) 随着微电子技术的发展及微机技术在国内外的广泛应用，90年代到近几年出现了微型高压开关机械特性测试仪。目前国内生产高压断路器机械特性仪的厂家很多，型号也不少，性能方面各有特点，主要区别在测量速度的传感器有所不同。光栅传感器的特点是光栅尺可以直接测得断路器的行程及行程变化过程，还可以直接测得动触头行程(纵坐标)与动触头运动时间(横坐标)的特性曲线，以及以动触头行程(横坐标)与动触头运动速度(纵坐标)的特性。滑动电阻传感器的特点是通过测量电阻的电流或者电阻两端电压变化来反映出断路器的动触头运动速度，不能直接测得断路器的行程数值，只能间接地采用定标方法获得行程值。因此，只要光栅传感器测量行程的准确度能够满足真空断路器行程测量的误差要求，则以选择光栅传感器为好。只有在光栅传感器不能满足断路器测量要求，如测量某些型号 SF6 断路器外露的传动拐臂转动来表示处在封闭状态的动触头运动速度时，采用旋转滑动电阻传感器就比较理想^[2-4]。

虽然随着技术的进步，高压开关测试基本实现了自动化，但是长期以来，光栅、滑动电阻或旋转滑动电阻传感器需要固定在高压开关合适的位置，固定的是否牢固直接影响到测试的精度，而高压开关设计时并没有特意为传感器安装预留合理的位置，因此现场测试时安装一次传感器往往需要较长的时间。为满足各种不同型号高压开关机械特性测试需求，鉴于目前对高压开关机械特性测试中的问题，基于图像测量技术设计一种非接触高压开关机械特性测量系统具有巨大的实用价值。

2.3 高压开关机械特性测试系统设计方案

2.3.1 测试系统结构

基于图像测量技术的高压开关机械性能测试系统主要由数据采集模块、数据处理与分析模块和辅助控制模块组成，系统的总体结构如图 2-3 所示。其中数据采集模块主要由 CCD 和开关电信号检测器以及传输设备等组成。数据分析模块以计算机为核心，分析和计算采集模块传送的数据信息，运用图像处理和识别技术提取被测数据的特征信息。辅助控制模块包括 LED 光源、图像传感装置和电信号传感装置。

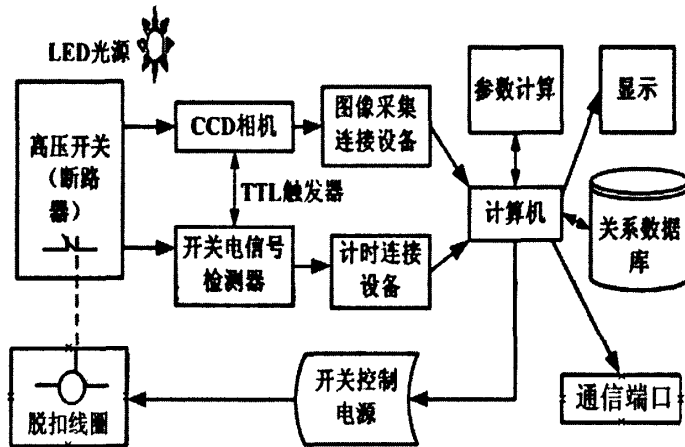


图2-3系统总体结构图

1) 图像采集模块

一般图像采集模块通常由采集设备、传输设备两个字模块组成。采集设备主要由 CCD (Charge Coupled Device) 或 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 摄像头组成。数字摄像头需高速拍摄断路器动作时图像，由于断路器动作时间达到毫秒级，所以对采集设备曝光速度有相当高的要求。拍摄到的图片通过同步或异步方式传输给计算机，传输设备一般选择电缆、光纤等材料，高速的拍摄同时也需要高速的传输，所以图像的采集对传输也提出更高要求^[16,17]。

本系统对图像采集模块的主要性能要求是：高速采集（至少达到 100 帧/秒）；获得的图像须要有较高分辨率；采集时要尽量少占用 CPU 时间，以留给计算机更多的 CPU 时间去做图像处理与分析。利用图像传感器测量将图像信息通过某些变换装置转换成数字信号，再经过各种处理之后，应用于计算和分析。CCD 具有自扫描、高分辨率、高灵敏度、结构紧凑及像素位置准确的特性，被广泛地用于工业非接触测量领域中，特别是在摄像和信号处理等技术领域。然而，一般的 CCD 摄像头很难达到系统要求。另外，高速的采集同时需要高速的传输速率^[9]。

研究初期拟采用 CCD 摄像头—1394 采集卡—计算机的模式进行图像的获取，

然而，严格的讲，IEEE1394 卡像 USB 一样只是通用接口，而不是视频捕捉卡。而且，1394 采集卡的最高传输速度是 800Mbps，实际采集时往往无法达到此速度。在对北京图像设备市场进行各方面调研后，最终选择高曝光速率的 CCD 摄像头完成图像采集任务，其每秒帧率可达到 100—200 帧，符合图像信息采集要求。数据传输技术采用目前流行的千兆网(GigE vision)传输技术，相对于模拟标准而言的优势是，它是数字的。相对于 IEEE1394 而言，GigE Vision 的最大优势是传输率更快，传输距离更长,完全能够满足本系统对图像采集，传输的要求。只须在 CCD 与电脑之间连接一条千兆网线并下载相应的驱动即可进行采集，不仅节省采集卡的费用，而且比 1394 卡更加简便和快捷。

2) 电信号采集模块

当断路器动作时，电量信号采集设备应快速准确的采集到断路器三相动作时各相的电信号，通过连接设备将信号传输到计算机。电信号的采集主要是指高压开关三相同期性的测试中，对开关三相动作时各个相的模拟信号以及合闸(分闸)线圈电流信号的采集，需要同时对上述 4 个信号完成采集要求。模拟信号采集模块包括数据采集 I/O 卡、连接电缆、端子及信号调理模块和相应的驱动程序。

一般 I/O 卡类型包括 PCI 总线卡、ISA 总线卡、运动控制卡和 PC/104 模块，不同的采集卡在处理速度、输入输出端口量上各有优势；市场上电缆一般分为 SCSI-II 电缆、D 型电缆和扁平电缆，不同的电缆对应不同的连接端口，并且各个电缆的传输速率也存在区别；端子模块主要分为信号调理模块、隔离 DI/O 端子和 I/O 接线端子板；软件驱动包括 DLL 驱动程序、LabVIEW 驱动程序、MATLAB 驱动程序和 ActiveDAQ。

经过市场调查和研究，从采集速度和经济综合考虑，拟采用研华的 PCI-1714U 模拟信号采集卡，该采集卡能实现同步 4 路模拟量输入，采集速率为 30M/秒，而开关动作速度为毫秒级，完全符合要求。电缆选用 37-Pin-D 型电缆，每根电缆末端为 DB-25-D 型插头。端子模块选用 ADAM-3925 接线端子板，该端子板为 DB-25 针孔型接口界限端子，和电缆符合。本文选用 LabVIEW 和 MATLAB 结合进行编程，驱动程序可在软件的官方网站上免费下载。

3) 数据分析模块

数据分析模块在计算机内部完成，计算机通过连接设备迅速采集数据，执行数据计算和存储，对高压开关的状态进行系统评估。该单元同时具有连接数据线和网线端口功能，以便需要的时候将该系统直接连接到互联网或打印设备，完成测试结果的快速传输和打印。对信号的处理分析一般分为预处理和识别两大部分。

信号预处理部分：因为被测设备运行环境的复杂性决定了待测信号干扰较多，

所以,如何将信号中没用信息部分尽可能的滤除是数据分析模块要完成的重要任务之一,也是整个系统的关键部分。本文通过对大量实测信号的分析,对比图像处理技术中各种用于噪声滤除的方法,提出了将图像增强、图像灰度化、阈值分割、边缘提取等方法应用于信号的预处理。

模式识别部分:对处理后信号的模式识别部分采用神经网络算法。通过对网络的训练,使其具有识别目标的能力。以实测信号作为输入,网络对每幅图片进行分析识别,对目标对象进行定位。

由于采集的图像信息具有的数字矩阵特性,本文采用 MATLAB 作为核心处理平台。MATLAB 全称是 Matrix Laboratory(矩阵实验室),一开始它是一种专门用于矩阵数值计算的软件,从这一点上也可以看出,它在矩阵运算上有自己独特的特点。实际上 MATLAB 中的绝大多数的运算都是通过矩阵这一形式进行的。这一特点也就决定了 MATLAB 在处理数字图像上的独特优势。理论上讲,图像是一种二维的连续函数,然而在计算机上对图像进行数字处理的时候,首先必须对其在空间和亮度上进行数字化,这就是图像的采样和量化的过程。二维图像进行均匀采样,就可以得到一幅离散化成 $M \times N$ 样本的数字图像,该数字图像是一个整数阵列,因而用矩阵来描述该数字图像是最直观最简便的了。而 MATLAB 的长处就是处理矩阵运算,因此 MATLAB 为数字图像处理提供了一种简单、快捷而又有效的方法,大大提高了数字图像处理的效率及效果。

MATLAB 在本系统中作为核心处理软件,还是有不足之处。界面开发能力较差,并且数据输入、网络通信、硬件控制等方面都比较繁琐。因此,社会各个领域很少有用 MATLAB 单独开发的。通常都将其作为一种辅助工具,和其它语言结合起来,通过混合编程进行软件的开发。

美国 NI 公司推出的 LabVIEW 语言是一种优秀的面向对象的图形化编程语言。LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)是实验室虚拟仪器集成环境的简称,是一个开放型的开发环境,使用图标代替文本代码创建应用程序,拥有大量与其它应用程序通信的 VI 库。作为基于数据流的编译型图形编程环境,它把语言编程简化成用简单或图标提示的方法选择功能(图形),并用线条把各种图形连接起来的简单图形编程方式。LabVIEW 主要用于开发数据检测、数据测量采集系统、工业自动控制系统和数据分析系统等领域,是虚拟仪器系统的主要开发工具之一。对于大多数的编程任务,LabVIEW 通常能产生高效的代码,但其也存在不足,不适于进行大量数据处理,不能完全提供用户所需要的驱动子程序,对底层操作不易实现等情况,因此常需要借助其他语言或利用其它软件开发环境(如 Visual C++、MATLAB 等)来开发满足特殊功能^[7-9]。

综合考虑,本文将 LabVIEW 图形化界面操作简单、开放型的开发环境优势和

MATLAB 数据处理能力以及 MATLAB 在图像处理方面的优势相结合, 实现 MATLAB 与 LabVIEW 混合编程。发挥 LabVIEW 的开发效率高、可维护性强、测试精度、稳定性和可靠性特点, MATLAB 功能强大的数据处理能力和丰富的算法库和图像处理优势。利用 MATLAB 作为内部核心开发平台, LabVIEW 开发人机界面。以 LabVIEW 为“表”, 以 MATLAB 为“里”, 实现两大软件的优势互补^[7-10]。

4) 辅助控制模块

辅助控制模块主要包括光源、TTL (Transistor-Transistor Logic, 逻辑门电路) 和其它相关辅助装置。光源是影响计算机视觉系统输入的重要因素, 因为它直接影响输入数据的质量和至少30%的应用效果, 好的光源与照明方案往往是影响整个系统成败的关键。光源与照明方案的配合应尽可能地突出物体特征量, 在物体需要检测的部分与那些不重要部分之间应尽可能地产生明显的区别, 增加对比度, 同时还应保证足够的整体亮度, 尽可能突出所要提取的特征。由于没有通用的图像测量照明设备, 所以针对每个特定的应用实例, 要选择相应的照明装置, 以达到最佳效果。照明系统的设计一般遵循以下原则:

- (a) 确定被测部分或特征, 使被测部分或特征清楚地与周围的背景区分开来。例如, 尽量增强被测部分或特征边缘的对比度等。因为如果可以把待检测的物体和背景清楚地分开, 就可以大大减少图像处理算法的复杂性, 从而减少图像处理的运算时间, 也可以减少软件开发的时间和难度。
- (b) 减少反射。这样可以减少由于光照而给图像带来的额外的噪声, 使客观景物尽量以不失真的面貌成像, 减少图像处理算法的步骤。而且应尽量屏蔽环境光线的影响。

本课题要测量真空断路器动触头的行程, 即断路器动作过程中动触头的运动位移, 为便于后期图像处理识别, 要求图像特别是目标物体的边缘轮廓较清晰, 又要尽量减少断路器金属表面的反光。根据这一特点, 照明方案选择卤素灯进行照明, 卤素灯具有光色好、亮度高、颜色不失真、寿命长和体积小等优点, 实验证明可达到较满意效果^[7,9]。

2.3.2 测试系统工作原理

测试系统的初始运行首先是由计算机所控制的直流开关电源发出开动信号, 控制电流流经脱扣线圈, 而后对断路器的动触头线圈进行初始化同时刺激其机械装置动作, 而装置动作所表现出的机械特性及相关参数正是测试系统所要测量的对象。

首先, 系统要保证高压开关动作时的有效图像信息和电信号必须尽可能快速、完全地采集到计算机中。其中图像信息包含断路器动作时“行程”信息, 电信号包含动触头同步的相关信息。图像采集任务是由安放在高压开关附近的 CCD 数字摄

像头完成，经 CCD 高速采集到的图像经传输装置快速存储到计算机。图像中有效信息是断路器中连接动导电杆和触头弹簧，能准确反映动触头运动的情况的外部螺栓。如前所述，无论当合闸线圈或者分闸线圈通电时，螺栓都能正确反映断路器动作机械特性。当系统采集反映高压开关机械特性的外在信息后，进而对其研究分析，从中提取设备运行状况的有效信息。图 2-4 中红色方框内螺栓的运动轨迹，能较准确反映断路器动触头机械动作情况，实验通过对图中对象分析和计算，对比断路器标准参数，进而可对断路器相关机械特性进行评估。

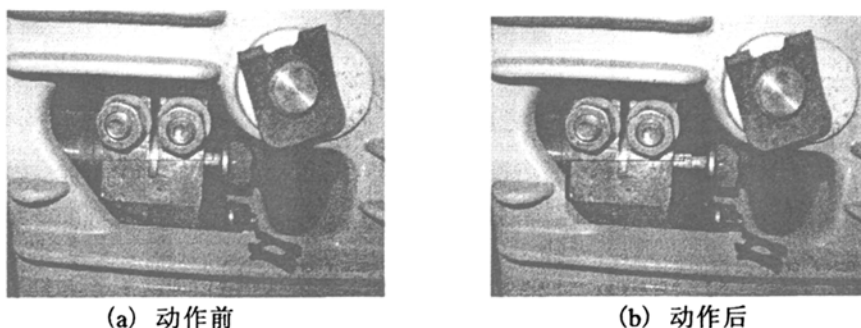


图 2-4 断路器动作前后螺栓位置变化情况

在后续的步骤中将完成有效信息的提取和分析。另外，利用时间计时装置可以获得动触头运动一段时间内所表征的电信号。在测试过程中，TTL 作为图像采集装置和电信号采集装置的“触发器”，适当的调整图像采集设备与 DAQ(Data-Acquisition Device)的协调一致，保持系统采集数据完全的同步性。

其次，计算机对所采集到的数据综合地进行处理和分析。包括图像的标定、预处理、感兴趣区域的分割和识别定位等，另外，动触头在开关动作过程中从开始位置到终止位置的距离等信息也会被分析得到。对于断路器来说是非常重要的参数，称为行程参数。而后通过分析定时采集到的每幅图片，可以计算得到动触头运动的速度。同理，其它机械特性相关参数也可以通过图像信息和电信息分析得到。

最后，通过对采集到的信息进行分析计算，断路器机械特性相关测试结果被存储到数据库中，以备查询、打印、管理和显示。此时，计算机完成计算、分析、存储数据的任务，并将数据和标准参数对比的工作。高压开关测试试验标准是以 IEEE 认可推荐的测试标准^[7,9,10]。

2.4 本章小结

本章首先介绍了真空断路器的操作过程及其主要机械特性参数，论述了高压开关机械特性测试几种基本方法及其特点。在此基础上，介绍了以计算机、图像采集设备、电信号采集设备和辅助控制设备为主要设备组成的高压开关机械特性测试系

统。设计了系统主要图像采集模块、电信号采集模块、数据分析模块和辅助控制模块，其中重点阐述了数据分析模块的构成以及系统整体工作原理。本文的后续章节将围绕该方案进行，研究高压开关同期参数的测试方法和图像处理方法与识别技术。

第三章 高压开关三相同期性的检测

断路器的三相触头应尽量做到准确跳开和准确闭合。如果分合严重不同期将造成线路或用电设备的非全相介入或切除,可能导致危害设备绝缘的过电压等电力事故,对触头也会带来很大损伤。因此,对断路器的三相同期性的测试是非常必须和重要的。

3.1 断路器三相同期性相关特性参数

同期:定义为三相动触头与静触头最先合与最后合或最先分与后分之间的时间间隔。如果不同期较大,将会严重影响真空断路器开断过电流的能力,影响断路器的寿命,严重时能引起断路器爆炸。据中华人民共和国行业标准(DL 403-1991)规定,真空断路器三相不同期性不大于 2ms。不同型号的开关的不同期不尽相同,其具体的处理方法有:

- (1) 在保证行程、超行程的前提下,通过调整三相绝缘拉杆的长度使同期、弹跳测试数据在合格范围内。
- (2) 如果通过调整无法实现,则必须更换数据不合格相的真空泡,并重新调整到数据合格。

合闸同期性是指真空断路器在合闸过程中三相动、静触头接触的最大时间间隔。分闸同期性是指真空断路器在分闸过程中三相动、静触头分离的最大时间间隔。由于分、合闸同期性是相对的,数值也差异不大,所以一般情况下只考核三相合闸同期性。三相同期性差的断路器将严重影响开关的分断能力,容易产生过长的燃弧时间。由于断路器的分合闸速度较快,开距较小,通过准确调试,达到参数要求并不困难。

由于短路电流开断时无法选相,所以首开相出现在哪一相上是随机的。如果真空断路器有良好的分闸同期性,就可最大限度地保证动、静触头同时分离,同时出现电弧,按照概率均等考虑,首开相在三相中的分布也大致均匀。如果断路器的分闸同期性不好,就会导致首开相、后开相不能均匀分布在三相上。首开相电流负荷重,后开相燃弧时间长,妨碍真空断路器的开断性能。三相断路器在开断短路电流时,如果有一相未开断,三相同时被判为开断失败。因此,各相负载不均,一相过载,另一相负荷不足,其结果必然影响三相整体寿命,使真空灭弧室的潜力得不到充分地利用。为使真空断路器的作用能得到充分发挥,在没有负载的情况下,真空断路器的分闸同期性越小越好,使首开相在三相中的分布能保持均匀^[8,11,12]。

3.2 常用三相同期性测量方法

对于断路器三相同期性的测试，以前通常采用“三灯泡法”测量慢速断路器三相同期性，如图 3-1 所示。试验时采用手动慢合慢分，待触头刚合的瞬间在对应相的提升杆上划上一个记号，最后测量各记号的距离。最先亮的(或最先熄的)和最后亮(或最后熄的)灯泡之间的距离为最大合闸(或分闸)误差。如果误差过大，应进行调整，直至灯泡同时亮(或同时熄)为止。实验室使用的电源电压最好用 36V 交流电比较安全。

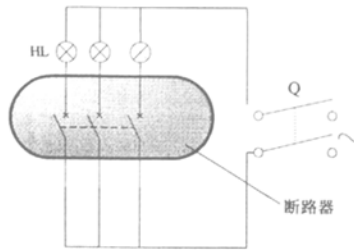


图 3-1 断路器三相触头同期性测定接线图

HL-指示灯，Q-电源开关

虽然三灯泡法可以简单、直观的完成断路器三相同期性的测量，然而该方法却难以克服的在准确性和可靠性上存在的问题^[14]。

对于快速断路器，一般采用示波器录波或数字式毫秒表测量同步性，可得到较准确结果。录波图如图 3-2 和图 3-3 所示。

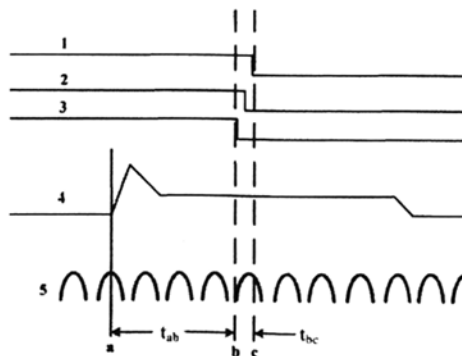


图 3-2 断路器分闸录波图

1~3-断口的波形；4-分闸电流线；5-时标；

t_{ab} -分闸时间； t_{bc} -分闸不同期性；

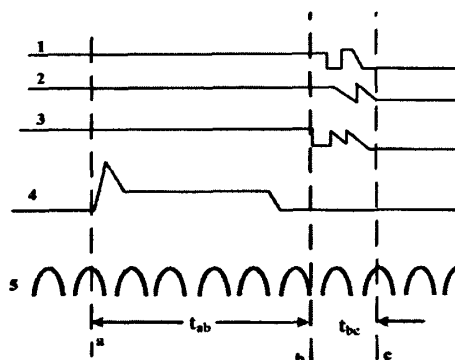


图 3-3 断路器合闸录波图

1~3-断口的波形；4-合闸电流线；5-时标；

$t_{ab} + t_{bc}$ -合闸时间； t_{bc} -合闸不同期性

利用示波器录波测量三相不同期性较“三灯泡法”具有较高的精确性和鲁棒性。由于示波器时标方位宽、精度高，且能直观反映出断路器在动作过程中有关参量的变化情况，因此，过去一直是测量断路器机械特性的主要方法。然而，示波器笨重的实验仪器，每次必须到现场进行测试的繁琐，使得该测试方法更加消耗人力和物力。随着电子技术的发展，目前已有很多断路器采用计算机来完成电信号的采集和分析。基于计算机技术的测量时代已逐步取代了示波器的年代^[11-15]。

3.3 系统三相同期性测量步骤与方法

3.3.1 测量步骤

考虑到现场测试的繁琐和不便，此次三相同期性测试选择在实验室进行模拟试验，利用交流接触器代替断路器进行仿真实验。测试系统采用以计算机为核心，电信号为媒介的，首先由计算机通过开关控制电源向断路器发送启动信号，数据分析部分同时开始计时。当断路器三相动作时，由开关电信号检测器完成三相动作电信息的采集，通过连接设备将信号经过 A/D 转换传送回计算机。计算机对比采集到的断路器三相动作信息，分析三相动作的准确性，流程如图 3-4 所示。测试利用脱扣线圈电流包含的信息来排除机械干扰信号带来的影响，从而提高断路器三相同期性在线监测的可靠性。



图 3-4 三相同期性测试步骤图

3.3.2 三相同期性测量方法与接线

测试电路所加电源包括三相+12V 测试电源、交流 220V 电源和供采集所用的 +5V 电源。+12V 电源用于刺激发光二极管，从而影响采集点电位的高低；交流 220V 电源作用于图 3-5 中 D 合闸线圈，促使断口断开或闭合；+5V 为信号采集时提供电源。信号采集卡如第二章所采用的 PCI 信号采集卡。

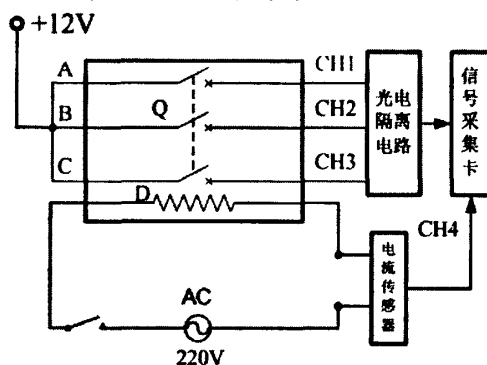


图 3-5 三相同期性测试接线示意图
Q-高压开关三相断口；CH1、CH2、CH3-三相连接通道；
D-合闸线圈

测试开始时，给 A、B、C 三相外加 12V 电压，作为信号电压，当 Q 闭合时，所加的 12V 电压可通过 CH1、CH2、CH3 三通道流入光电隔离电路，光电隔离主要电路如图 3-6 所示，图中只显示单断口对应的光电隔离测试电路，其余两相测试电路相同。当所加+12V 电压信号刺激二极管 E 闪烁时（此处通过二极管 E 的亮或不亮来反映断口的闭合和断开动作特性），E 的亮或不亮将导致 F 点电平的高低变化。断口信号经光电隔离后，如测试合闸信号 E 将从不亮变为亮，在 F 点得到低电平；如测试分闸信号 E 将从亮变为不亮，在 F 点得到高电平。

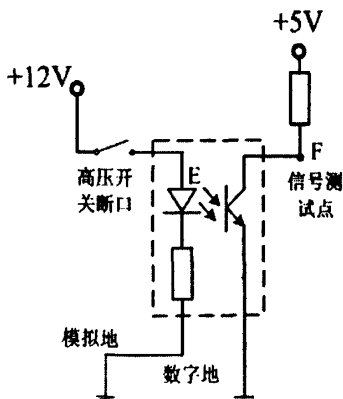


图 3-6 光电隔离接线示意图

给 D 线圈所加的 220V 交流电源，作为触发电源。当计算机通过开关控制电源向 D 发送闭合信号时，Q 迅速闭合；当计算机向 D 发送断开信号时，Q 迅速断开。信号采集卡为 PCI 四通道同步采集，除了对 CH1、CH2、CH3 三通道进行同步采集外，同时对交流电源进行采集，电源经电流传感器转换为电压信号输送到信号采集卡。

3.3.3 三相同期测量实验结果分析

考虑到断路器动触头运动的行程小、速度快，而电压信号和时钟信号要求同步完成，三相分合闸时间测量误差均在毫秒数量级。本文采用四路同步模拟信号采集设备，采集速率在第二章已经介绍，符合采集要求。对于多断口断路器还应测量同相各断口间不同期性。分、合闸同期性应按高压断路器设备的实际运行操作方式测量，对确因弧触头或保护环接触不一而造成的同期性误差，经鉴别后可不计入。

如图 2-3 所示，启动信号通过开关控制电源送到脱扣线圈，经脱扣线圈使断路器动作。为了能自动检测高压开关动作，系统利用电信号作为媒介来完成校时和时间间隔的产生。图 3-5 中 D 点处合闸时线圈电流波形如图 3-7 所示。合闸线圈电流波形图中，当合闸电流达到 0.8 左右时，高压开关动作。

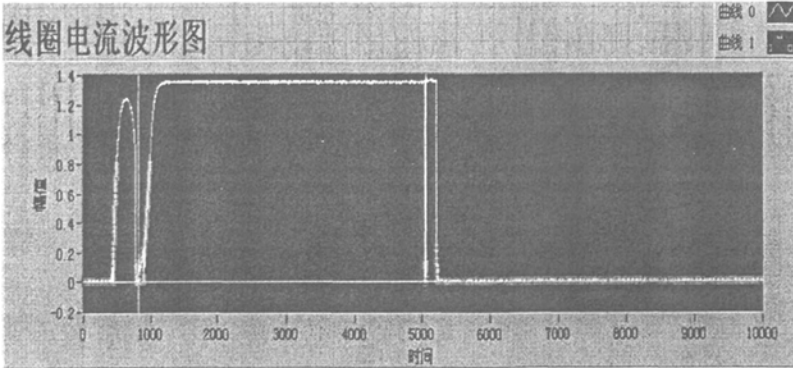


图 3-7 合闸线圈电流波形图

对动作时的高压开关进行模拟信号的同步采集，采集结果如图 3-8 所示，图中，黄、绿、红三种颜色分表代表 A、B、C 三相模拟信号。

根据已选取的下限值 0.8 将模拟信号图转化为数字波形图，如图 3-9 所示，其中大于下限值的为高电平 1，小于下限值的为低电平 0。然而，由于图中选取范围偏大，很难分辨动作弹跳细节，对图 3-7 进行展开处理，展开后如图 3-10 所示。

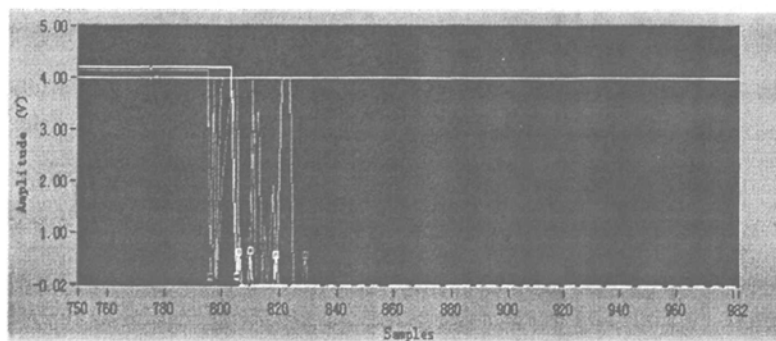


图 3-8 模拟量波形采集

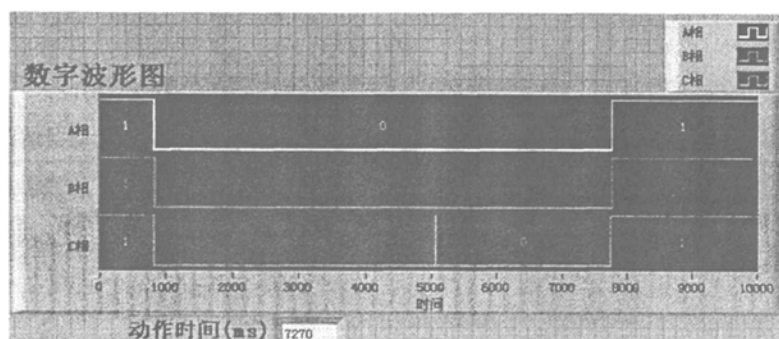


图 3-9 处理前数字波形

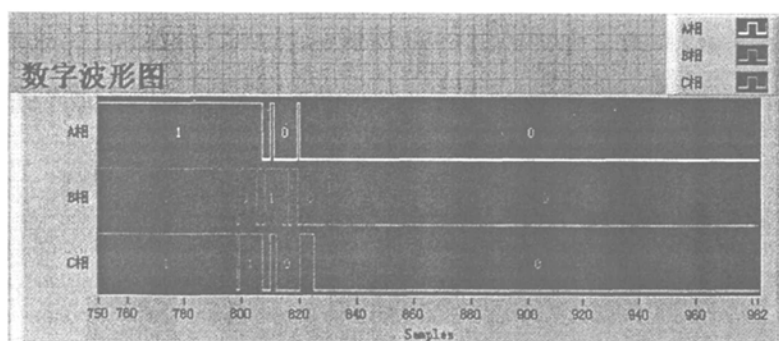


图 3-10 处理后数字波形

在图 3-10 中，图 3-8 中高低起伏的波形得到具体完整的体现，图 3-8 中的上升沿和下降沿跟图 3-10 中的高低电平相对应。图 3-10 中 A、B、C 三相连续的高低电平方波反映了合闸过程中触头弹跳事件。在合闸过程中，由于动触头具有较高的速度，动、静触头相互碰撞时触头表面发生弹性变形，反力作用使动触头被推开，然后再接触又被推开的现象，严重者反复 4~5 次。通过图 3-10 中三相最先合闸时间和最后合闸时间可以得出三相不同期性。进而可以判断高压开关是否满足同期要求。

由于高压开关动作时间短、动作快，系统通过数据分析模块对采集的信号进行分析和计算。程序框图如图 3-11 所示。程序框图处理顺序从左到右，先根据下限值

和波形处理将模拟信号转化为数字信号，而后经过一系列分析判断得出弹跳次数和弹跳时间。进而输出分析结果，判定同期性是否满足要求。

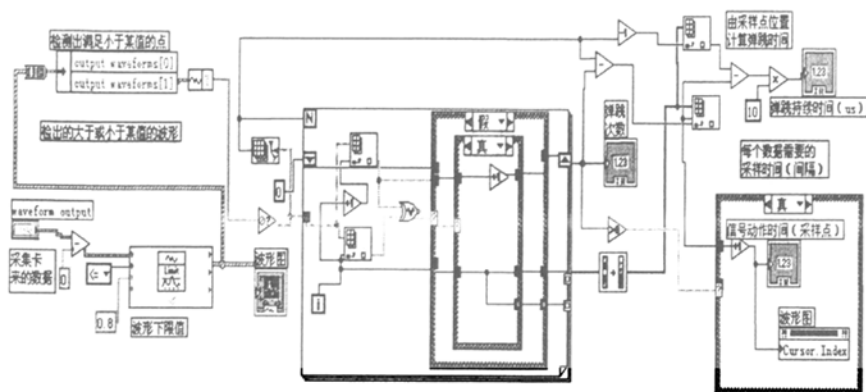


图 3-11 判断三相同期子程序框图

3.4 本章小结

本章首先对断路器三相同期性测量相关原理进行了简单介绍，对常用的几种测量方法进行分析和评估。而后在对三相同期性电路介绍的基础上分析阐述了测量的方法。该方法具有设计方式灵活、原理简单、精度高、抗干扰能力强和测试结果直观优点，且测试工具简单易操作，较大的提高了测试的灵活性与可靠性。采集的模拟、数字信号阐述本文三相同期性的测量与分析。最后通过实验所测波形对实验进行分析与说明。

第四章 图像的预处理

图像预处理的主要目的是改善图像效果，消除图像中无关的信息，恢复有用的真实信息，增强某些对于后续处理来说比较重要信息可检测性，最大限度地简化数据，从而改进图像识别和定位的可靠性。

通常根据预处理目的的不同，把预处理归为图像增强和图像分割两类。图像对比度处理是空间域图像增强的一种方法。由于图像灰度范围狭窄会使图像的对比度不理想，可用对比度增强技术来调整图像灰度值的动态范围。本系统图像预处理包括图像灰度化、图像的增强、图像的去噪、二值化、边缘提取，如图 4-1 所示。

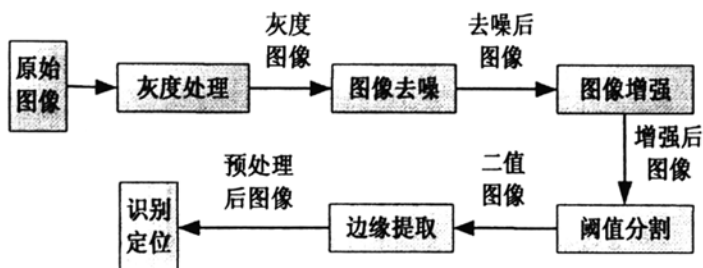


图 4-1 图像预处理

4.1 灰度处理

图像采集设备得到的是真彩图像，也就是所谓的 RGB 图像，在 MATLAB 中存储为 $n*m*3$ 的数据矩阵。数组中的元素定义了图像中每一个像素的红、绿、蓝颜色值。像素的颜色由保存在像素位置上的红、绿、蓝的灰度值组合来确定。图形文件格式把 RGB 图像存储为 24 为的图像，红、绿、蓝三色分别占 8 位。MATLAB 在处理真彩图像时速度会非常慢，而且图像矩阵一般又很复杂，因此，为了对图像矩阵进行降维处理和提高数据处理速度，将 RGB 图像进行灰度处理，转变为二维灰度图像。二维矩阵中每一个元素对应于图像的一个像素点，通常 0 代表黑色，1、255 或 65、535(针对不同存储类型)代表白色。大多数情况下，灰度图像很少和颜色映射表一起保存，但是在县市灰度图像时，MATLAB 仍然在后台使用预定义的默认的灰度颜色映射表^[16-19]。

首先，利用 `imread` 函数读入真彩图像，如图 4-2 中的 (a) 图，读入图像同时，MATLAB 已将图像矩阵化，不妨此时设矩阵为 A ， A 为三维矩阵。如上段所说，每一个像素点(元素)都是有红、绿、蓝三个数组成。利用 `rgb2gray` 函数对真彩图像进行灰度处理，将原来的三维矩阵 A 转换为由 1 到 255 组成的矩阵 B ，此时矩阵 B 为二维矩阵，将矩阵图像化，如图 4-2 中的 (b) 图所示。

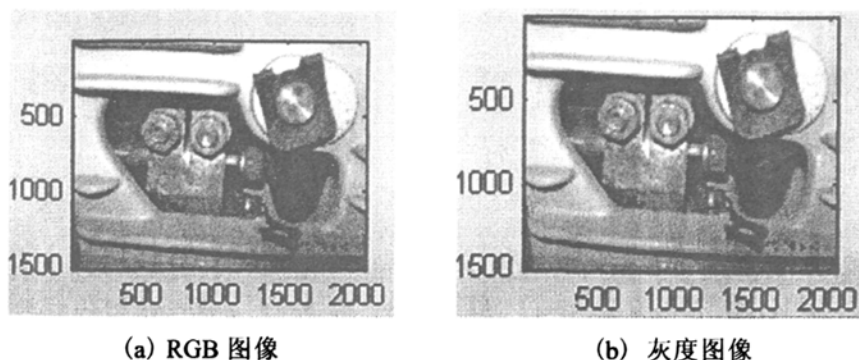


图 4-2 RGB 图像到灰度图像

4.2 图像去噪

在图像采集过程中，往往受到各种噪声源的干扰，引起噪声的原因很多，如敏感元件的内部噪声、热噪声、传输信道的干扰噪声以及量化噪声等。噪声产生的原因决定了噪声的分布特性以及它和图像之间的关系，通常噪声可以分成加性噪声、乘性噪声、量化噪声等。这些噪声恶化了图像质量，使图像模糊，甚至淹没特征，给图像分析带来困难。经典的平滑技术对噪声使用局部算子，当对某一个像素进行平滑处理时，仅对它的局部小邻域内的一些像素进行处理，其优点是计算效率高，而且可以多个像素并行处理。近年来，常用的方法包括噪声门限法、邻域平均法、加权平均法和中值滤波等。

(1) 噪声门限法去噪

噪声门限法是一种简单易行的噪声消除方法，它对于因传感器或者信道引起的呈现孤立离散分布的单点噪声具有较好的效果。运用噪声门限法进行图像去噪时，首先设定门限值，然后顺序检测图像的每一个像素，将该像素与其邻域内的其他像素进行比较判断，以确定是否为噪声点；若为噪声点，则以其邻域内所有像素灰度的平均值替代，否则，以原灰度值输出。

假设像素 (i, j) 处的灰度为 $f(i, j)$ ，以该像素为中心取一个 $N \times N$ 的窗口 ($N=3, 5, 7, \dots$)，该窗口内的像素点组成的集合记为 A ，定义灰度差值门限 T 、误差计数器 Cnt 和计数器门限值 Y 。对每个窗口，误差计数器 Cnt 的初始值都为 0。对集合 A 中的每一个像素点 (i', j') 的灰度 $f(i', j')$ ，若满足

$$\varepsilon(i', j') = |f(i', j') - f(i, j)| \geq T \quad (4-1)$$

则误差计数器 Cnt 加 1。位置 (i, j) 处的平滑输出为

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & \text{Cnt} < Y \\ \frac{1}{N^2 - 1} \sum_{(i', j') \in A \setminus \{(i, j)\}} f(i', j') & \text{Cnt} \geq Y \end{cases} \quad (4-2)$$

当窗口顺序移过整幅图像，即可完成噪声的平滑。需要注意的是，该方法中门限值 T 的选择至关重要， T 太大，则噪声平滑不理想， T 太小，平滑图像会变得模糊。计数器门限的选择一般在窗口内像素数的一半附近。选取合适的噪声门限，对于呈现孤立离散分布的点噪声，就可以取得满意的去噪效果。当图像中含有的噪声比较复杂，不是孤立分布时，就要选取其它的去噪方法。

(2) 中值滤波去噪

中值滤波是一种局部平滑技术，是一种非线性方法。由于它在实际运算过程中并不需要图像的统计特性，所以使用比较方便。在一定条件下，可以克服线性滤波器带来的图像细节模糊，而且对滤除脉冲干扰及颗粒噪声最为有效。

中值滤波是采用一个含有奇数个点的滑动窗口，用窗口中各点灰度值的中值来替代窗口中心像素的灰度值。中值滤波的效果依赖于两个要素：领域的空间范围和中值计算中涉及的像素数。图 4-3 中是几种典型信号的中值滤波。

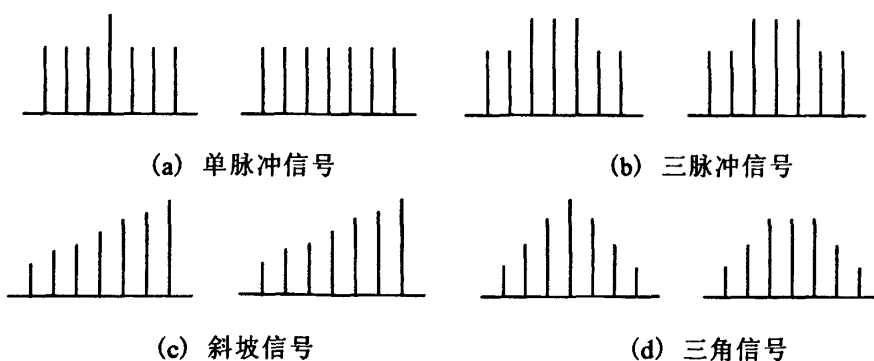


图 4-3 典型信号的中值滤波

其中，中值滤波窗口的选择是多种多样的，以下是几种常用的滤波器窗口。

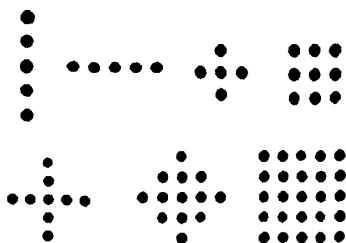


图 4-4 二维中值滤波器常用的几种窗口

设有一个一维序列 f_1, f_2, \dots, f_n 。取窗口长度为 m (m 为奇数)，对此序列进行中值滤波，就是从输入序列相继抽出 m 个数， $f_{i-v}, f_{i-v+1}, \dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+v}$ ，其中 f_i 为窗口的中心值， $v = m - 1/2$ ，再将这 m 个点值按大小排列，取其序号为正中间的那个数为滤波输出。用数学公式表示为：

$$Y_i = Med \{f_{i-v}, \dots, f_i, \dots, f_{i+v}\} \quad i \in Z, v = \frac{m-1}{2} \quad (4-3)$$

在实际使用窗口时，窗口的尺寸一般先用 3 再取 5，逐点增大，直到其滤波效果满意为止。对于有缓慢变化的较长轮廓线的物体的图像，采用矩形或圆形窗口为宜；对于包含尖顶角物体的图像，适宜用十字形窗口。使用二维中值滤波最值得注意的是要保持图像中有效的细线状物体。如果图像中点、线、尖角细节较多，则不宜采用中值滤波^[20-23]。

对于含有随机噪声的图像，用中值滤波可以去除噪声，但是图像中的一些细节也失去了，图像变得相对模糊。尤其是当窗口选取较大的时候，图像模糊程度相应的增加，如图 4-3 中 (c) 所示，所以中值滤波在选取窗口的大小时是个关键的问题，根据具体的图像和含有的噪声要选择不同的滤波窗口。

通过上面两种滤波方法的处理结果可得出结论：对于含有离散的、与图像像素差别较大随机噪声，可采用门限去噪法。处理的速度较快，效果也比较好。当图像噪声与图像本身像素值的差不是很大时，宜用中值滤波方法，对那些细节较多的图像，就要采用其它的处理方法。综合分析，最后选用中值滤波方法。效果图如图 4-5 所示。

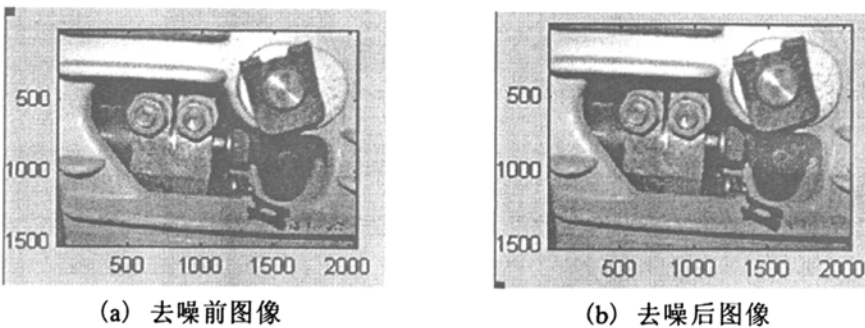


图 4-5 图像平滑去噪效果图

图像平滑的目的就是为了减少和消除图像中的噪声，以改善图像质量，有利于抽取对象特征进行分析。

4.3 图像增强

图像增强是指经过某种处理使图像改变，改善图像的视觉效果，实现增强对比度、增加清晰度、改善视觉效果等目的，以便于数据抽取或识别。采用直方图修改技术是目前比较常见的进行灰度图像增强的手段。直方图修改技术很多，如直方图线性变换、直方图修正法和直方图均衡化等。本文利用直方图均衡化方法来修改直方图，使得图像的灰度分布趋向均匀，图像所占有的像素灰度间距拉开，加大了图像反差，改善视觉效果，达到增强目的。直方图均衡化处理算法描述如下。

原始图像灰度级 r 归一化在 $0\sim 1$ 之间，即 $0\leq r\leq 1$ 。 $P_r(r)$ 为原始图像灰度分布的概率密度函数，直方图均衡化处理实际上就是寻找一个灰度变换函数 T ，使变换后的灰度值 $s=T(r)$ 。其中，归一化为 $0\leq s\leq 1$ ，即建立 r 与 s 之间的映射关系，要求处理后的图像灰度分布的概率密度函数 $P_s(s)=1$ ，期望所有灰度级出现概率相同。

在灰度变换的 dr 和 ds 区间内，像素点个数是不变的，因此有

$$\int_{r_j}^{r_j+dr} p_r(r)dr = \int_{s_j}^{s_j+ds} p_s(s)ds \quad (4-4)$$

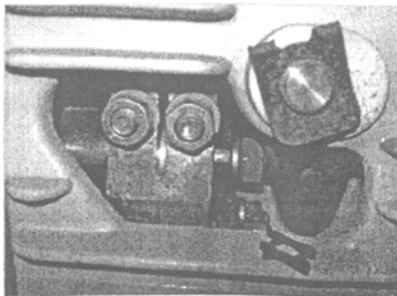
当 $dr \rightarrow 0$ ， $ds \rightarrow 0$ ，略去下标 j 有 $ds/dr = p_r(r)/p_s(s)$ 。由于 $s = T(r)$ ， $p_s(s) = 1$ ，则

$$\frac{dT(r)}{dr} = p_r(r) \quad (4-5)$$

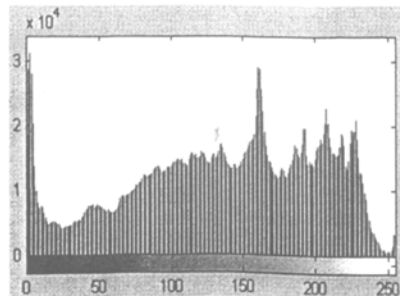
最终得到直方图均衡化的灰度变换函数为：

$$S = T(r) = \int_0^r p_r(r)dr \quad (4-6)$$

利用 MATLAB 中的 `imadjust` 函数，对已去噪的图像进行增强处理，如图 4-6 中的 (c) 图。同时，使用 `imhist` 函数分别求出增强前和增强后的直方图，如图 4-6 中的 (b) 和 (d) 图。对比原始图像和经过预处理后的图像可以看出，预处理使图像亮度增加，对比度提高，降低了图像采集过程中的噪声对以后的模板匹配过程的干扰，并且强化了图像特征，使其特征有利于识别。



(a) 原始图像



(b) 原始图直方图

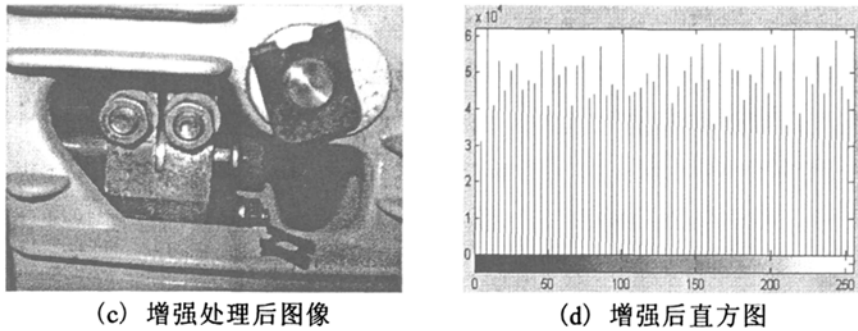


图 4-6 灰度图像直方图修正效果图

4.4 图像分割

图像分割是一种经典的目标检测技术，它依据图像的灰度、颜色或几何性质将图像中具有特殊含义的不同区域区分开来，这些区域是互不相交的，每一个区域都满足特定区域的一致性的要求，而任意两个相邻部分的合并都会破坏这种一致性。比如对含有目标物体的图像，不仅需要将图像中属于该物体的像素(或物体特征像素点)从背景中分割出来，而且还要将属于不同物体的像素点分离开。

一般分割出来的区域应该同时满足：

- (1) 分割出来的图像区域具有均匀性和连通性。其中，均匀性指的是该区域中的所有像素点都满足基于灰度、纹理、色彩等特征的某种相似性准则，连通性是指该区域内存在连接任意两点的路径。
- (2) 相邻分割区域之间针对选定的某种差异具有显著性。
- (3) 分割区域边界应该规整，同时保证边缘的空间定位精度。

以上的条件用数学描述，即

- (a) $\bigcup_{j=1}^n S_j = F$
- (b) $S_i \cap S_j = \emptyset, (i \neq j)$
- (c) $P(S_j) = \text{TRUE}, (\forall j)$
- (d) $P(S_i \cup S_j) = \text{FALSE}, (i \neq j)$

其中， F 表示图像中所有像素的集合， $P(\square)$ 表示均匀性假设中某个或某些区域所占总体的比重， F 可以划分为若干个子集，即 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ，其中每个子集都构成一个空间连通区域^[24]。

到目前为止，图像分割的基本方法或基于区域内部的特性具有某种均匀性的原则，或基于区域之间的特性具有某种不连续性的原则。具体可归纳为以下几种常见的分割技术：①阈值分割技术；②聚类分割技术；③区域生长技术；④区域分裂与

合并技术；⑤边缘检测与跟踪技术；⑥小波分析技术；⑦模糊分割技术。本系统将阈值分割和边缘检测相结合运用于图像预处理，先进行阈值分割而后再边缘检测[24-26]。

图像阈值化分割是一种常用，同时也是最简单的图像分割方法，它特别适用于目标和背景占据不同灰度级范围的图像。它不仅可以极大的压缩数据量，而且也大大简化了分析和处理步骤，因此在很多情况下，是进行图像分析、特征提取与模式识别之前的必要的图像预处理过程。图像阈值化的目的是要按照灰度级，对像素集合进行一个划分，得到的每个子集形成一个与现实景物相对应的区域，各个区域内部具有一致的属性，而相邻区域布局有这种一致属性。这样的划分可以通过从灰度级出发选取一个或多个阈值来实现^[25]。

如果图像的像素用 $f(x,y)$ 表示，假设图像 $f(x,y)$ 的灰度级范围是 (Z_1, Z_k) ，设 T 是 Z_1 和 Z_k 之间的 1 个数，那么阈值处理后的图像 $g(x,y)$ 定义为：

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{--如果 } f(x,y) \geq T \\ 0 & \text{--如果 } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (4-7)$$

任何满足 $f(x,y) \geq T$ 的点 (x,y) 称为对象点，其它点则称为背景点。标注为 1 的像素对应与对象，而标注为 0 的像素则对应于背景。在 MATLAB 中工具箱中提供了一个称为 graythresh 的函数，该函数使用 Otsu 方法来计算阈值。该方法是在判别最小二乘法的基础上推导出来的。基本思想是：取一个阈值 t ， t 将图像像素按灰度大小分为大于 t 和小于 t 两类，然后求出两类像素的平均值方差 δ_b^2 (类间方差) 和两个累各自的均方差 δ_A^2 (类内方差)，找出使两个方差 δ_b^2 / δ_A^2 最大的阈值 t ，该阈值即为二值化图像的最佳阈值。具体的算法如下：设给定的图像有 1, 2, 3, ……L, 共 L 级灰度，阈值设为 k ，把灰度大于 k 像素分为两类。类 1 中的像素总数为 $W_1(k)$ 平均灰度为 $M_1(k)$ ，方差为 $\delta_1^2(k)$ ；类 2 中的像素总数为 $W_2(k)$ ，平均灰度为 $M_2(k)$ ，方差为 $\delta_2^2(k)$ ；所有图像像素的平均值为 M_r 。

类间方差 δ_b^2 和类内方差 δ_A^2 分别由下式决定：

$$\delta_b^2 = W_1(M_1 - M_r)^2 + W_2(M_2 - M_r)^2 = W_1 W_2 (M_1 - M_2)^2 \quad (4-8)$$

$$\delta_A^2 = W_1 \delta_1^2 + W_2 \delta_2^2 \quad (4-9)$$

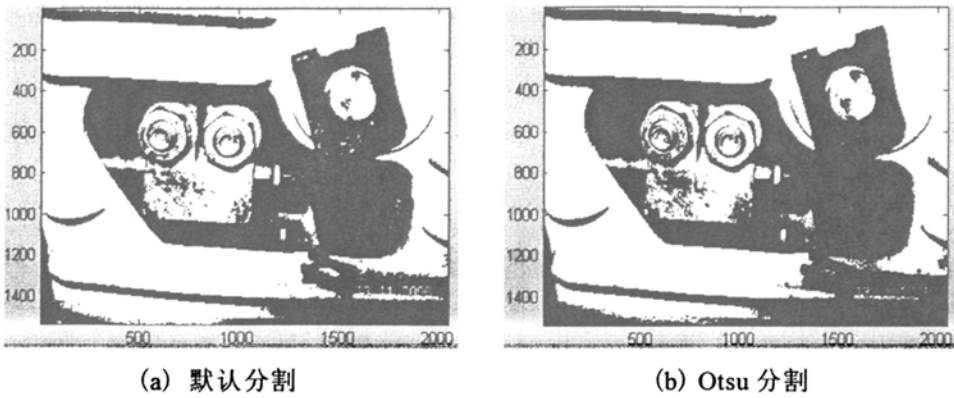


图 4-7 阈值分割效果比较图

如图 4-7 所示，(a)图是在 MATLAB 默认阈值情况下进行的分割，通常默认分割阈值为 0.5。(b)图是经过 Otsu 算法计算得出的阈值进行分割的二值图。部分程序如图 4-8 所示，利用 Otsu 算法进行计算，得出分割阈值为 0.524。由图中可以比较看出，(b)图中目标螺栓边缘相对(a)图中的目标螺栓更具连续性并且更具有可区分性。

```

XXXXXXXXXX图像预处理，运用otsu方法进行图像分割XXXXXXXXXX
T1=0.5*(double(min(I31(:)))+double(max(I31(:))));
done=false;
while ~done
    g=I31>=T1;
    T1next=0.5*(mean(I31(g))+mean(I31(~g)));
    done=abs(T1-T1next)<0.5;
    T1=T1next;
end
T2=0.5*(double(min(I32(:)))+double(max(I32(:))));
done=false;
while ~done
    g=I32>=T2;
    T2next=0.5*(mean(I32(g))+mean(I32(~g)));
    done=abs(T2-T2next)<0.5;
    T2=T2next;
end
yuzhi1=T1/225;
yuzhi2=T2/225;
    
```

图 4-8 Otsu 算法求阈值部分程序

Otsu 算法是基于图像像素的灰度分类，按照使类间方差与类内方差比值最大的原则获得门限值，使目标占背景之间方差最大，找出方差比最大的阈值。经过阈值分割后的图像称为二值图像，图像矩阵均为 0 和 1 组成。然而，图像矩阵相对于其它矩阵来说仍然相当复杂，需经过边缘检测，提取图像特征部分的边缘轮廓。边缘是指图像局部亮度变化最显著的部分像素的集合。图像的边缘对应着图像灰度的不连续性。显然图像的边缘很少是从一个灰度跳到另一个灰度这样的理想状况。真实

图像的边缘通常都具有有限的宽度呈现出陡峭的斜坡状。边缘主要存在于目标与目标、目标与背景、区域与区域(包括不同色彩)之间,是图像分割、纹理特征提取和形状特征提取等图像分析的重要基础^[16,24]。

图像中的边缘通常与图像亮度或图像亮度的一阶导数的不连续有关。经典的边缘检测方法通常是利用边缘邻近的一阶或二阶导数的变化规律来进行的。数字图像的求导通常是利用差分近似微分来实现的。边缘检测通常借助空域微分算子进行,通过将算子模板与图像进行卷积来完成边缘检测。常见的边缘检测有:梯度算子、Robert 算子、Sobel 算子、Gauss-Laplacian 算子、拉普拉斯算子等^[22-24]。

(1) 梯度检测算子

边缘检测是检测图像局部显著变化的最基本运算。边缘的锐利程度由图像灰度的梯度决定。梯度是一个向量,指出灰度变化的最快的方向和数量。在一维情况下,阶跃边缘同图像的一阶导数局部峰值有关,梯度是函数变化的一种度量,而一幅图像可以看作是图像强度连续函数的取样点阵列。

梯度是一阶导数的二维等效式,对于图像 $f(x, y)$, 在 (x, y) 处的梯度为一矢量

$$G(x, y) = [G_x \quad G_y] = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \right] \quad (4-10)$$

梯度的幅值如下:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4-11)$$

在实际应用中,通常用绝对值来近似梯度幅值。

$$|G(x, y)| = \max(|G_x|, |G_y|) \quad (4-12)$$

由矢量分析可知,梯度的方向定义为

$$\alpha(x, y) = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (4-13)$$

其中角 α 是相对 x 轴的角度。

对于数字图像,式(3-27)可用差分来近似计算,简单的梯度近似表达式为:

$$G_x = f[i, j+1] - f[i, j] \quad (4-14)$$

$$G_y = f[i, j] - f[i+1, j] \quad (4-15)$$

其中, j 对应 x 轴方向, i 对应负 y 轴方向。直接用上式计算,会受到噪声影响。

为解决此问题，常用 2×2 一阶差分模板来求 x 和 y 的偏导数：

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

将邻近的微分值相加，其结果相当于求了两倍的微分值，而不是平均值，在一定程度上增加了鲁棒性。

(2) Roberts 算子

最简单的边缘检测算子是用图像的垂直和水平差分来逼近梯度算子，1963 年 Roberts 提出了边缘检测算子，Roberts 交叉算子为梯度幅值计算提供了一种简单的近似方法：

$$G(i, j) = |f[i, j] - f[i+1, j+1]| + |f[i+1, j] - f[i, j+1]| \quad (4-17)$$

用卷积模板表示方法，上式变成：

$$G(i, j) = |G_x| + |G_y| \quad (4-18)$$

它是一个由 2×2 模板作用的结果，可表示为：

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

Roberts 算子是直观的也是简单的，针对不同灰度图效果也不一样。

(3) Prewitt 算子

Prewitt 边缘检测算子是一种类似 Sobel 边缘检测算子的边缘模板算子，通过对图像进行八个方向的边缘检测，将其中方向响应最大的作为边缘幅度图像的边缘 [19,20]。

$$s_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad s_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

图 4-9 Prewitt 算子

如果在每个点噪声都是相同的，那么 Prewitt 算子处理效果比较好。事实上，Prewitt 算子对噪声很敏感，图像的离散差分对噪声比对原图像更敏感，可以通过先对图像做平滑处理以改善结果。

(4) Gauss-Laplacian 算子

Gauss-Laplacian 算子是一种二阶边缘检测法，通过寻找图像的灰度值的二阶微分中的零穿越来检测边缘点，其算子用模板卷积表示为：

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

图 4-10 Gauss-Laplacian 算子

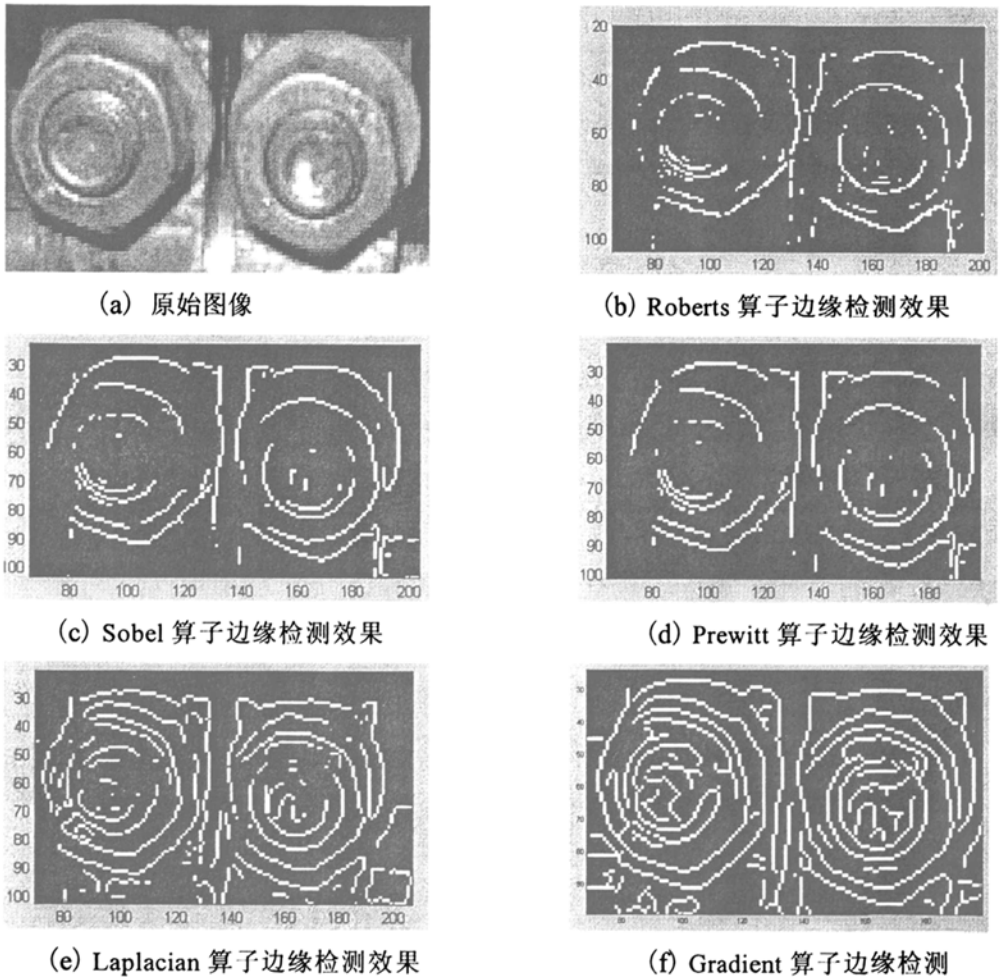


图 4-11 断路器螺栓边缘检测效果图

通过上面介绍的阈值分割和边缘检测的方法，本文对采集图像进行阈值分割和边缘检测处理，效果如图 4-11 所示。

图 4-11 中，(a)为原始图像中非常重要有效信息-螺栓，其运动轨迹反映了动触头的运动行程，后期识别和定位就是对螺栓信息的处理和计算。(b)是用 Roberts 算子边缘检测结果，(c)是用 Sobel 算子边缘检测结果，(d)是用 Prewitt 算子边缘检测结果，(e)是用 Laplacian 算子边缘检测结果，(f)是用 Gradient 算子边缘检测结果。(c)图比(b)、(d)两图更具有连续性，较(e)、(f)两图更简化，综合连续性和复杂性

考虑，系统选用 Sobel 算子进行边缘检测。

4.5 本章小结

本章对图像采集设备采集的图像进行了预处理，比较了不同算法的去噪、强化、边缘检测和阈值分割等的结果，可见对于不同的图像需要选取不同的处理方法，对图像进行必要的处理，效果更佳。利用直方图可实现图像的二值化分割，可减小将来图像识别中的运算规模，并且能够提高电力设备图像识别的实时性。经过处理和分析，结果表明，处理后的图像更加准确和简单，为后续的模式识别和定位工作打下了基础。

第五章 识别定位方法和参数计算

为计算高压开关机械特性参数并分析高压进而分析开关机械特性状态，测试中获取的特定图像经预处理后，需要采用合适的对感兴趣的目标识别和定位。本章首先介绍识别合定位的常用方法，然后采用 BP 网络对目标进行识别，最后完成距离转换和计算参数。

5.1 目标识别与定位相关原理

5.1.1 模式识别

识别又称模式识别，是六十年代迅速发展起来的一门学科，近年来取得了大量的研究成果，在很多领域得到了成功应用。从一些个别的事物或现象推断出事物或现象的总体，一般把整个类别叫做“模式”，而把具体的对象叫做“样本”。模式识别问题就是研究一种自动技术，依靠这种技术，机器能够自动地(或人尽量少干预地)把待识别样本分配到各自的模式中^[31]。

一般的模式识别系统有两个过程组成，即设计和实现。设计是指用一定数量的样本进行分类器的设计。实现是指用所设计的分类器对待识别的样本进行分类决策。模式识别系统主要包括数据获取，预处理，特征提取和选择，分类决策四个部分。如图 5-1 所示。

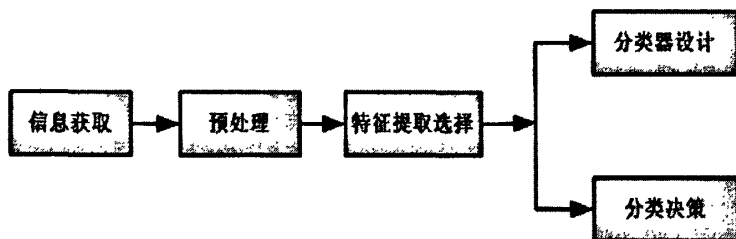


图 5-1 模式识别系统组成

通过测量，采样和量化，可以用矩阵和向量表示输入对象的信息，这即是数据获取的过程。通常对象的信息有下列三种类型：

- 1) 二维图像，如文字，地图，照片等。
- 2) 一维波形，如脑电图，心电图，机械振动波等。
- 3) 物理参数和逻辑值，如体温，各种化验数据，或者“痛”与“不痛”等。

预处理的目的是去除噪声，加强有用信息，并对测量仪器或其他因素造成的退化进行复原。上一章已经详细阐述^[25,29]。

为了有效地实现分类识别,就要对原始数据进行变换,得到最能反映分类本质的特征,这就是特征提取和选择的过程。一般的,把原始数据组成的空间叫做“测量空间”,把分类识别赖以进行的空间叫“特征空间”。通过变换,可以把维数较高的测量空间中表示的模式变为维数较低的特征空间中表示的模式。常用的特征有统计特征,结构特征,数学变换特征和逻辑特征等。良好的特征应具有以下四个特点:

- 1) 可区分性-对于属于不同类别的图像来说,它们的特征值应具有明显的差异。
- 2) 可靠性-同类图像特征值应比较接近。
- 3) 独立性-各特征之间应彼此不相关。
- 4) 数量少-模式识别系统的复杂度随系统维数(特征的个数)迅速增加。

通常目标识别既要区分相近的不同目标又要在同一目标发生姿态、尺度、位置变化时不致误判,此外目标识别算法还要对于光照变化、噪声干扰、背景变化有一定的鲁棒性,有时为了达到实时性,目标识别算法还必须在足够短的时间内完成。这导致识别过程非常复杂,信息量和计算量都很大。目前在目标识别和定位方法中,还没有通用的方法能对不同情况的目标均能准确识别定位,多是针对某一情况有效。

目前,有些目标识别方法当识别出目标即能对目标定位,有些则不能,当识别出来后,还需要对目标进一步定位。在图像识别的发展中,出现了几类有代表性的理论和方法 1)匹配的图像识别方法; 2)句法图像识别方法; 3)神经网络图像识别方法^[25-30]。

匹配的图像识别方法:匹配的图像识别方法,通常指的是针对目标本身,构造一类有别于其他物体的特征,或者将一帧图像中的若干子图像直接作为所要辨识目标的模板,对另一帧做搜索,以寻找对应的部分。目标识别的过程也就是匹配的过程,可以在图像空间进行,直接利用像素灰度模板匹配,如最常见的是颜色、轮廓、频域特征等等。匹配可以在整个空间进行,即通过对原始图像加窗扫描,和目标模板图像匹配,实现目标的识别及定位,因为这种方法要在含有目标的图像中逐行逐列进行匹配,因此计算量非常大。为了减少计算量,也可以在整幅图像中的一个子空间内进行,一般选择含有目标状态的邻域为目标匹配的搜索域。匹配准则一般包括最大互相关函数、最小均方差函数、最小平均绝对差值函数、最大匹配像素统计等。不同的匹配准则的数学含义不同,计算代价也不同。匹配有各种加速算法,比如 SSDA、三步搜索、菱形搜索、并行处理或多分辨率匹配等方法。匹配的目标识别方法优点在于定位精度高。缺点为:

- 1) 当目标发生旋转、平移或亮暗变化时常常导致识别及定位失败。
- 2) 当目标较小时,背景不断发生变化时发生匹配失败。

3) 相关计算量大。

由于以上缺点的存在，匹配的目标识别技术适于以下几种情况：

- 1) 目标不发生旋转变化的，即只有平移运动。
- 2) 目标所在环境背景简单。
- 3) 目标自身特征不存在较大变化。

由于在实际情况下，往往不能保证目标始终作平移运动，此外目标在图像中的尺度和形状也不一定总是保持不变的。因此说，基于匹配原则的目标识别方法具有一定的局限性，虽然许多学者针对其局限性提出了一些改进方法，取得了一定效果，但算法大多比较复杂，并且不能从根本上改变其局限性。

句法(或结构)图像识别方法：句法图像识别方法是以形式语言理论的概念为基础的。它分析图像的结构，把复杂结构的图像看成是由简单的子图像所构成，又把最简单的子图像作为基元，从基元的集合出发，按照一定的文法(构图规则)去描述复杂的图像。这类似于英语中的句子由单词按一定的文法连接而成。给定一个输入模式基元串，判别其是否被文法识别器接受的过程就是图像识别。由于提取图像的基元特征十分困难，句法图像识别方法应用得并不广泛^[28]。

神经网络图像识别方法：人工神经网络具有信息分布式存储、大规模自适应并行处理、高度的容错性等优点，特别是其学习能力和容错性对处理图像识别问题具有独到之处。神经网络目标识别，一般需要两个过程：训练过程和实际识别过程。在训练过程通过有指导或无指导学习方式对大量有代表性样本学习，把通过学习得到的经验存储在网络结构中，学习完毕即找到一组合适的网络连接权值。在识别过程中当把未知模式输入到网络中时能根据学习到的知识对未知模式进行判断。对于网络识别结果是否为目标或为何种目标，常用 0、1 组合的形式表示。当然有时也采用最大或最小准则，即当神经网络输出层中输出最大(或最小)的节点对应的图像属性为输入图像的属性。

由于采集图像中的目标随着位置的不断变化，光源对目标的照射会根据位置的不同发生变化，这将导致目标表面亮度等因素的不同，继而在图像上所采集的目标(螺栓)会发生变化，如果利用模板匹配方法，由于该方法存在的弊端，将很难完成识别任务和达到识别要求。所以，经过综合分析，最终决定选用神经网络方法进行图像中目标的识别。

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是近几年开始应用于图像模式识别的一种重要的工具和方法可以理解为一个由大量类似于生物神经系统的简单计算处理单元(神经元)构成的非线性动力学系统。人工神经网络在不同程度和层次上对人脑神经系统的信息处理、存储和检索等功能进行了模仿，并且具备学习、记

忆和计算的能力。由于人工神经网络表现出类似于人脑的学习分类能力以及并行、分布式处理方式，使得图像在模式识别上的处理方式有了质的飞跃。另外，由于其具有自学能力，在进行图像识别时，可以先把许多不同的图像样板和对应的识别结果输入到人工神经网络，这样网络就会在训练中通过自学功能慢慢学会识别类似的图像。这种自学功能对于预测有着特别重要的意义。总而言之，人工神经网络在模式识别问题上，相比其他传统方法的优势大致可以总结为以下三点：①要求对问题的了解少；②可对特征空间进行较为复杂的划分；③适合于用高速并行处理系统来实现。但是，人工神经网络同其他理论一样也不是完美的，也有其固有的弱点，比如需要更多的训练数据，在非并行处理系统中的模拟运行速度很慢，以及无法获取特征空间中的决策面等。

本测试系统采集到的图像经过一定的预处理，很大程度减少了神经网络需要处理的数据量，提高了训练速度和精度。常用于识别的神经网络有 BP 神经网络与 Kohonen 神经网络。人工神经网络进行目标识别的优势在于通过对有代表性的样本进行学习，能识别带有噪声或形变的输入模式，能把识别处理和预处理融合成一体进行，此外经过学习后的神经网络具有较高的容错性、推理能力和鲁棒性。神经网络因其智能性成为近年来一个研究热点问题。然而因为 Kohonen 算法它仅以输出层中的单个神经元代表某一类模式。所以一旦输出层中的某个输出神经元损坏，则导致该神经元所代表的该模式信息全部丢失。考虑到稳定性，选择 BP 神经网络^[25-30]。

BP 网络是一种单向传播的多层前馈网络，因为其通过不断比较网络的实际输出与期望输出的差异从网络的输出层到输入层反向调整网络权值，随着这种误差逆的传播修正不断进行，网络对输入模式响应的正确率也不断上升，当网络能够正确识别出全部样本时（这里认为当网络能够正确识别出所有样本时近似达到全局最小）停止调整网络权值，结束训练。这种误差逆向传播的学习算法称为 BP 算法，以这种算法进行学习的前馈神经网络称为 BP 网络。在实际使用当中，常常设定一个阈值，当网络收敛到小于此阈值时停止训练，其结构如图 5-2 所示。

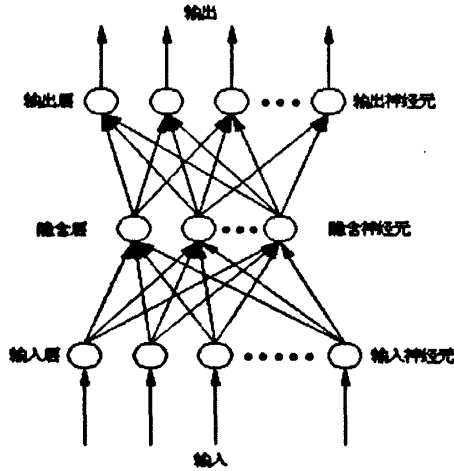


图 5-2 前馈神经网络结构图

BP 网络是一种具有三层或三层以上的神经网络，包括输入层、中间层(隐含层)和输出层。前后层之间实现全连接，而每层神经元之间无连接。

与感知器模型不同的是，BP 网络的传递函数要求必须是可微的，所以不能使用感知器网络中的二值函数，常用的有 Sigmoid 型的函数、正切函数或线性函数。由于传递函数是处处可微的，所以对于 BP 网络来说，一方面，所划分的区域不再是一个线性划分，而是由一个非线性超平面组成的区域，它比较平滑的曲面，因而它的分类比线性划分更加精确，容错性也比线性划分更好；另一方面，网络可以严格采用梯度下降法进行学习，权值修正的解析式十分明确^[27,29-34]。

5.1.2 定位方法分析

在目标识别过程中，当目标在整幅图像中所占比例超过三分之二，或目标在整幅图像的中心附近时，识别出目标是否存在，也就大致找到目标在图像中的位置。但在实际情况中，由于目标在图像中存在尺度和位置和角度变化，所以尽管通过前面介绍的方法可以识别出目标是否在图像中，但有时却很难确切的在整幅图像中对目标进行定位，因此在识别出目标以后，还有必要对目标进行定位。

传统的目标定位方法如模板匹配，通过加窗搜索的方法，在图像中寻找和模板最为相似的目标子图像，进而找到目标的位置。匹配算法的基本公式有 5-1 和 5-2，其中 $F(m, n)$ 为目标图像， $T(m, n)$ 为模板图像^[32,33]。

$$NC(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(m, n) F(m+i, n+j)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T^2(m, n) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F^2(m+j, n+i)}} \quad (5-1)$$

$$NC(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (T(m, n) - \bar{T}(m, n))(F(m+i, n+j) - \bar{F}(m+i, n+j))}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N ((T(m, n) - \bar{T}(m, n))^2 (F(m+i, n+j) - \bar{F}(m+i, n+i))^2)}} \quad (5-2)$$

可以看出该算法比较复杂, 虽然目前提出了一些改进算法但总的来说这类方法计算还是相对繁琐, 所需搜索时间比较长。一般为了减少计算时间, 把搜索域定在目标附近。模板匹配方法在识别出目标的同时也就找到目标的大致位置, 其优势是把识别和定位合在一起, 缺点是当目标发生角度变化、尺度变化及光照变化的情况时如果不更新模板会导致匹配失败。为此一些学者提出了基于特征的匹配方法。这类特征有图像的不变矩特征、直方图特征及角点边缘点特征等, 近年来小波特征也被用来作为匹配点进行匹配计算。虽然基于某种特征的匹配算法能够在目标发生旋转光照等情况识别出目标, 但总的来说匹配的识别定位方法运算量还是比较大。

找图像形心的方法也是一种定位方法, 其基本计算公式如 5-3:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (5-3)$$

其中 \bar{X} , \bar{Y} 分别表示形心的横纵坐标。 $\sum_{i=1}^n M_i X_i$, $\sum_{i=1}^n M_i Y_i$ 分别表示质点系对 Y 轴和 X

轴的静力矩, $\sum_{i=1}^n M_i$ 表示该质点系的总质量。针对图像该形心公式可写成如下形式:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m pixel(i, j) i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m pixel(i, j)} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m pixel(i, j) j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m pixel(i, j)} \quad (5-4)$$

其中 $pixel(i, j)$ 为 (i, j) 点的像素值, i, j 分别是该像素的横纵坐标。该方法不受目标形变的影响, 缺点是需要对图像进行复杂的处理, 此外这种方法只能对计算区间的目标进行定位, 而不能区分目标是否为需要定位的目标。

通过图像采集设备拍摄的图像, 随经过一定的预处理, 在一定程度上减少了计算量并提高了处理速度, 然而, 处理后的图像矩阵相对比较复杂, 处理数据量仍然很大。另外, 数据分析模块对目标的定位不能一直依靠人为的进行分析定位, 更多的工作应该由计算机来完成, 所以, 对系统的自动化和智能化提出了更高的要求。从这两方面考虑, 模板匹配和图像形心的方法都有一定的弊端。

利用神经网络的方法实现目标位置的确定优点在于,神经网络能从训练样本中自动获取知识,逐步学会适应环境的变化,并能把学到的知识推广到以前未曾处理过的情况。即神经网络具有较强容错能力、自适应能力和自学习能力。而且,神经网络方法通过不断的对图像矩阵进行学习和培训,使得网络对矩阵的熟悉度越来越高,处理速度会相应的得到改善。

5.2 基于 BP 网络的目标识别和定位

本系统识别过程具体可分为如下四个阶段:

- (1) 选取样本-初始化网络: 图像经过预处理之后, 由用户选取感兴趣区域(本课题以固定在动导电杆上特定螺栓)作为样本输入, 如图 5-3 中红色方框内所示。将选择的样本(为 0, 1 组成的矩阵)输入 BP 网络, 网络的权值事先已进行初始化。在网络的隐含层(第一层)设计了 10 个神经元, 关于神经元数目的选择不仅需要经验也还要有猜测的成分。为了更加精确, 可以选择若干目标对象对网络进行训练。

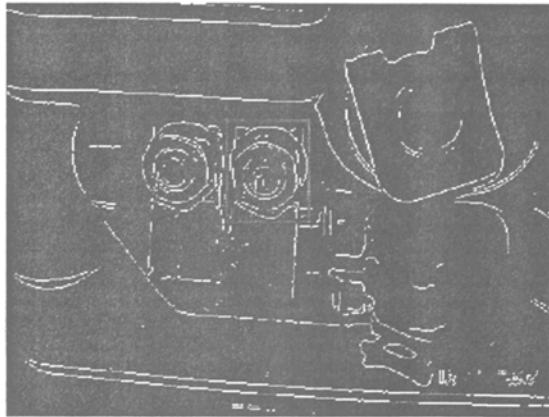


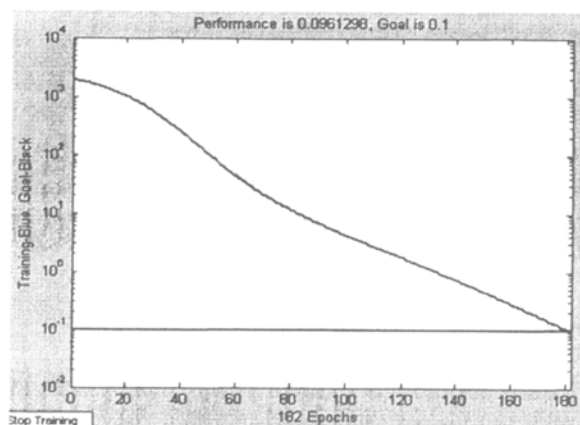
图 5-3 识别样本的提取

- (2) 训练网络: 为了使产生的网络对输入向量有一定的容错能力, 最好的办法就是使用理想信号又使用带有噪声的信号对网络进行训练。具体做法是先用理想的输入信号对网络进行训练, 知道其平方和误差足够小。接下来, 使用若干组理想信号和带有噪声的信号进行训练。在输入带有误差的向量时, 要输入两倍重复的无误差信号, 这样做的目的是为了保证网络在分辨理想输入向量时的稳定性。在网络进行了上述训练以后, 网络对无误差的信号可能也会采用对付带有噪声信号的办法。这样做就会付出较大的代价。因此, 可以再一次训练网络。这一次就只使用理想的向量进行训练。这样就可以保证在输入端输入理想信号时, 网络能够最好地其做出反应。如下图所示, 网络在 182 个时间单位时收敛, 如图 5-4 所示, 网络平方和误差小于 0.1。

```

TRAINING, Epoch 0/5000, SSE 1913.78/0.1, Gradient 60.1356/1e-006
TRAINING, Epoch 20/5000, SSE 1020.36/0.1, Gradient 55.419/1e-006
TRAINING, Epoch 40/5000, SSE 246.822/0.1, Gradient 17.3229/1e-006
TRAINING, Epoch 60/5000, SSE 44.3463/0.1, Gradient 3.50493/1e-006
TRAINING, Epoch 80/5000, SSE 11.5599/0.1, Gradient 0.950668/1e-006
TRAINING, Epoch 100/5000, SSE 4.23408/0.1, Gradient 0.353666/1e-006
TRAINING, Epoch 120/5000, SSE 1.76833/0.1, Gradient 0.14894/1e-006
TRAINING, Epoch 140/5000, SSE 0.730946/0.1, Gradient 0.0619034/1e-006
TRAINING, Epoch 160/5000, SSE 0.284818/0.1, Gradient 0.0242107/1e-006
TRAINING, Epoch 180/5000, SSE 0.106213/0.1, Gradient 0.00905005/1e-006
TRAINING, Epoch 182/5000, SSE 0.0961298/0.1, Gradient 0.00819238/1e-006
TRAINING, Performance goal met.
    
```

(a)



(b)

图 5-4 BP 网络训练收敛示意图

- (3) 目标定位：如图 5-5 所示。网络经过训练，基本已达到识别能力。将系统采集到的所有图像输入数据分析模块中图像处理和分析部分。这里假设第一步选择的样本为 T_0 ， T_0 为一个 $M * N$ 的矩阵，左上角关键点设为 A 点。在需要检测的第一幅图像中，由 A 点坐标 (x_0, y_0) 开始向左侧扫描。首先由 A 点移动到 $(x_0 - 1, y_0)$ 点并截取 $M * N$ 的矩阵，将矩阵作为样本输入网络进行识别，看是否达到要求。如果不符合误差允许范围，继续向左扫描。当扫描到 B 点 (x_1, y_1) 时，截取的矩阵输入网络中符合误差允许范围时，记录 B 点坐标，依此类推，在各个图像中寻找 C、D、E……，记录各点位置坐标。

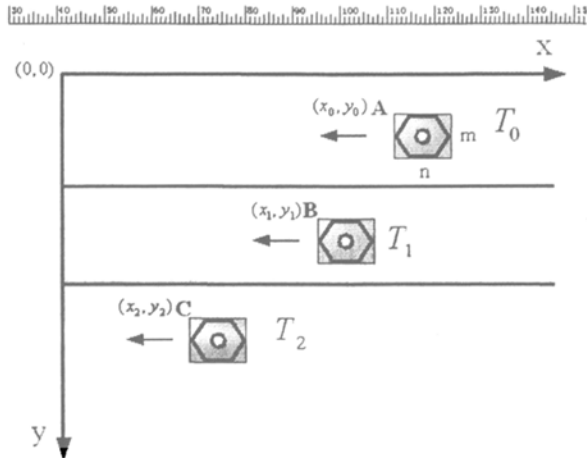


图 5-5 目标定位示意图

基于图像测量技术的测量系统中，测量结果往往是用像素数表示。目标经过识别和定位，也是基于像素进行各个机械特性参数的计算和分析。要将图像中像素距离转换为实际距离，必须进行像素距离到实际距离的换算，即寻找被测物体表面上的坐标与映射到摄像机平面上点的坐标之间的关系，将图像坐标系转换为用户实际测量或检测所需的坐标系，以真实单位进行测量。测量结果如表 5-1 所示。

表 5-1 测量结果

目标位置	坐标 X	坐标 Y	旋转角度
图 1 中关键点	163.6	89.2	0
图 2 中关键点	147.4	88.3	0
目标位移 (像素)	16.21		
行程 (毫米)	11.28		

像素距离到实际距离转换的基本方法是在一定的摄像机模型及特定的实验条件下，利用如形状尺寸已知的标定物，经过图像处理，利用一系列数学变换和计算，求取摄像机模型参数。标定计算的复杂度与摄像机成像模型的复杂度有关。

通过摄像机采集图像以及标准件尺寸信息，传送到计算机转变为视频信号，采用经典算法进行边缘提取等图像处理，根据标准件的精确尺寸及放大倍数等先验知识，获取像素级精度的像素当量(指数字图像中的一个像素对应的物理空间的实际长度，它是测量中最重要的参数)，然后进行转换计算。

本文采用的转换方法不需要非线性优化方法求解，因而运算速度快，能够实现摄像机参数的实时计算。其缺点是：换算过程中不考虑镜头畸变，使得换算精度受到一定影响。但是因为本测试系统不设计三维测量，可以忽略镜头畸变。

以 MATLAB 为平台，利用 BP 神经网络技术，对图 2-4 中螺栓进行识别和定位计算。在收敛的基础上，识别正确率可达到 96.95%，本文同时利用一般的模板匹配对其进行识别，正确率为 94.34%。因此，通过实验可知，利用神经网络能提高识别的准确率。

5.3 分析计算和人机界面

5.3.1 参数的分析与计算

将高压开关分(合)闸动作特性采集到的每幅图像进行处理、分析、计算与转换，依据图 5-5 和图 2-2 示意进行对比分析和计算，可得到图 2-2 中目标物的触头开距 S_3 ，而采集的每幅图像时间间隔 ΔT 已知，继而合闸时间和分闸时间也可得到，合闸时间 $T = n\Delta T$ 。根据公式 2-3，刚合速度 $v = S_3 / T = S_3 / n\Delta T$ 。同理，可计算得到刚分速度、分闸速度等一系列机械特性参数。

整个图像处理、分析步骤图如图 5-6 所示。首先，将采集的图像经预处理，为后期分析和计算打下基础；然后，对目标在像素基础上进行识别与定位，确定各个关键点的坐标值和距离；其次，通过像素到实际距离的转换将基于像素基础的距离转化为实际距离；最后，计算得到需要的机械特性参数并对高压开关机械特性进行判定，完成测试的任务。

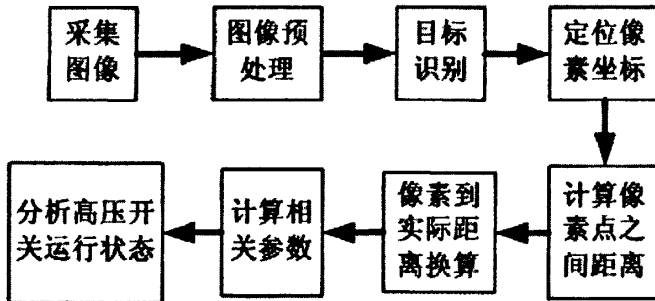


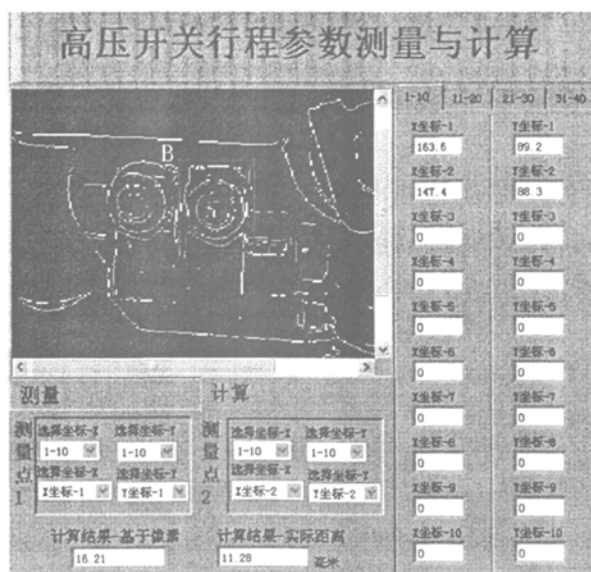
图 5-6 整体图像处理步骤图

5.3.2 人机界面

根据前面对图像测量技术和机械特性理论的论述，本文以 LabVIEW 编写人机界面，用面向对象编程语言 MATLAB 设计内部数据处理分析核心。如图 5-7 所示，图 (a) 是测量模式下的界面，通过左侧选择所要测量的图像，并根据需要保存各个图像中关键点的坐标值，保存的坐标值将在右侧保存并显示(可根据保存坐标数目的多少自主进行添加)。



(a) 测量状态下人机界面



(b) 计算状态人机界面

图 5-7 高压开关行程参数测量计算界面

图(b)是计算模式下的界面，以右侧保存的坐标值为依据进行选取，通过选择测量点1和测量点2的X、Y坐标，计算两点之间的距离。

5.4 本章小结

本章首先对模式识别原理和定位原理进行阐述，分析各个方法的优缺点和适应性。而后经过综合分析比较，选择BP神经网络算法进行识别和定位，论述了系统

对目标进行网络的识别和定位的具体方法和步骤。而后，简要阐述了像素到实际距离转换方法。最后，通过系统界面的介绍从整体上进行了总结和分析。

第六章 结论与展望

6.1 本文结论

基于图像测量技术和神经网络技术相结合对高压开关进行机械特性测试与分析是高压开关设备检测的新方法。在研究图像信息与高压开关运行状态之间的内在联系的基础上，通过采集装置完成高压开关动作时的图像信息和电信息，选择合理的算法有效地判断其动作情况，这对于发现设备故障隐患，保证其稳定可靠运行有重要的实际意义。

本文主要的研究工作体现在：

(1) 提出基于图像测量技术的测试系统总体方案

在分析高压开关触头动作的机械特性和图像测量技术内在联系的基础上，设计了高压开关机械特性测试系统总体方案，建立了一套集信号采集、数据处理与分析判定于一体的测试系统。

(2) 研究断路器三相同期性的检测

阐述了同期性相关原理和检测试验过程，实现了基于电信号采集的同期性检测。

(3) 完成图像预处理任务

针对采集的图像复杂的背景环境问题，利用图像处理技术对采集的图像信号进行预处理，突出图像中的有效信息。改变以前利用真彩图像进行分析处理的方法，找出最佳阈值点，转换为二值图像，为课题的后续工作打下良好的基础。

(4) 利用神经网络技术进行图像识别和定位

对预处理后的图像进行了识别和定位的分析，基于BP神经网络提出了对高压开关机械特性测试系统图像特征识别和定位的分析方法，提高了模式识别和定位的效率。

将图像测量技术融入到高压开关机械特性测试系统，可提高高压开关设备测试的准确性和可靠性，并可实现行程参数的非接触测量，有利于提高测试工作效率。由于时间限制，本文开发的测试系统还不十分完善。但可以相信，经过不断的深入研究和完善，建立在图像测量基础上的高压开关机械特性测试系统将会在电力系统安全运行中发挥巨大作用。

6.2 今后课题研究的展望

为了更好地完善高压开关动作机械特性测试效果，本文在研究图像测量技术和神经网络技术的基础上，将两种引入到高压开关设备故障诊断领域。并以断路器为研究对象，MATLAB 和 LabVIEW 为开发平台，构建了基于图像测量技术的测试系统。由于断路器运行状态复杂、故障类型丰富，加之时间有限，所以目前系统能识别的故障种类有限，系统数据库仍需不断完善。下一步工作重点仍然是利用图像测量技术提高断路器超行程等机械特性参数测量准确度。

参考文献

- [1] 吴国兴, 邹建伟. 论高压开关速度与时间的特性意义. 云南电力技术, 2007, 35(1): 48~52
- [2] 叶琦娅, 戴文进, 韩秀清等. 高压开关机械性能的检测. 江西电力, 2001, 25(1): 9~26
- [3] 刘全志, 师明义, 秦红三等. 高压开关在线状态检测与诊断技术制. 高电压技术, 2001, 27(5): 29~31
- [4] 常广, 王毅. 高压开关机械状态在线监测装置的研究. 高压电器, 2003, 25(2): 44~46
- [5] 李瑾, 李俊峰. 高压开关机械特性测试仪时间参数的校准. 企业标准化, 2006, 35(6): 45~46
- [6] 高军浩. 真空断路器合分闸运动特性对短路电流开断的影响. 东北电力技术, 2003, (6): 31~33
- [7] 迟婧. 基于计算机视觉的真空断路器行程测试方法的研究: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学电力工程系, 2008
- [8] 杨乐平, 李海涛. LabVIEW 高级程序设计, 清华大学出版社, 2003
- [9] 陈天翔, 王寅仲. 电气试验, 中国电力出版社, 2005
- [10] Guiyan Cui, Shutao Zhao, Chenguang Zhao, Baoshu Li. Novel HV Circuit Breaker Reliability Testing Measure Based on Image Processing. 2008 IEEE Power India Conference, 2008
- [11] 宋波, 陈一民. 关于虚拟仪器开发工具的比较与选取. 国外电子测量技术, 2006, 25(8): 1~5
- [12] 刘浩宇, 金长星. 高压开关分合闸同期性测试系统. 高电压技术, 2005, 31(1): 68~69
- [13] 杨飞, 王小华, 朱文卫等. 一种新的中压真空断路器三相同期在线监测方法. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 139~143
- [14] Polycarpou AA, Soom A, Swarnaker V, et al. Event timing and shape analysis of vibration bursts from power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 848~857
- [15] 单文培, 王兵等. 电气设备试验及故障处理实例, 中国水利水电出版社, 2006, 2

- [16] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法, 中国电力出版社, 2001, 8
- [17] 张红娜, 王祁. 图像测量技术及其应用. 电测与仪表, 2005, 40(7): 198~36
- [18] 许琳, 曹茂永. 图像测量技术及其在无损检测中的应用. 电子测量技术, 2008, 31(1): 137~140
- [19] Rafael C.Gonzalez, Richard E. Woods. 数字图像处理(美), 电子工业出版社, 2005
- [20] 张兆礼, 赵春晖等. 现代图像处理技术及 MATLAB 实现, 人民邮电出版社, 2001
- [21] 祝晓辉. 基于图像处理的电力设备识别方法研究: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学电力工程系, 2007
- [22] 罗军辉, 冯平. MATLAB7.0 在图像处理中的应用. 机械工业出版社, 2005
- [23] 苏金明, 王永利. MATLAB 图形图像. 电子工业出版社, 2005
- [24] 李弼程, 彭天强. 职能图像处理技术. 电子工业出版社, 2004
- [25] 吴川. 基于神经网络的目标识别及定位方法的研究: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006
- [26] 许锋, 卢建刚. 神经网络在图像处理中的应用. 信息与控制, 2003, 32(4): 344~350
- [27] 王焮, 张浩. 人工神经网络在图像识别中的应用. 中国科学博览, 2005, (4): 77~80
- [28] 陈华. 浅谈神经网络的图像识别技术及方法. 济宁师范专科学校学报, 2006, 27(6): 20~22
- [29] Horst Bischof, Ales Leonardis. Image and Vision Computing[M]. 2001, 619~629
- [30] 万来毅, 陈建勋, 王卫平等. 基于 BP 神经网络的图像识别研究. 武汉科技大学学报, 2006, 29(3): 277~292
- [31] 欧彦江. 基于神经网络的机械零件识别研究: [硕士学位论文]. 四川: 四川大学机械电子工程系, 2006
- [32] 闻新. MATLAB7.0 神经网络应用设计. 科学出版社, 2000
- [33] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计. 清华大学出版社, 2005
- [34] 梁路洪, 艾海舟. 基于模板匹配与人工神经网络确认的人脸检测. 电子学报, 2001, (6): 744~747

致 谢

本论文是在赵书涛老师的指导下完成的。在我的学习期间，导师赵书涛的悉心培养和精心指导，使我在两年多的求学生涯中受益匪浅，在学业和综合素质等各个方面都获得了很大的提高。赵老师严谨的治学态度，正直的作风将对于我今后的学习、生活和工作产生巨大的影响。在论文完成之际，特向赵老师表示衷心的感谢和深深的敬意！

在论文工作的即将顺利完成之际，我要感谢李宝树老师和贾秀芳老师的尽心指导与帮助，为我拓宽思路，解决难题提供了积极的建议，在此一并表示深深的谢意！

在此，感谢所有帮助过我的人！

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

- [1] 崔桂彦, 赵书涛, 李宝树, 赵晨光. Novel HV Circuit Breaker Reliability Testing Measure Based on Image Processing. POWERCON 2008 印度国际会议
- [2] 赵晨光, 赵君. 基于神经网络技术高压开关机械特性测试系统的研究. 河北省电机工程学会理论电工专业委员会'2008 学术年会
- [3] 崔桂彦, 牛文东, 赵书涛, 赵晨光. 基于虚拟仿真技术的电能计量错误接线检查培训系统. 高教探索
- [4] 牛文东, 赵晨光, 赵书涛. 基于电能计量错误检查培训系统的设计. 河北省电机工程学会理论电工专业委员会'2007 学术年会