基于图像识别的变电站核相验电操作机械臂研究

沈建忠[1]，孙雷[2]

（1. 国网上海市电力公司市北供电公司，上海 200072；
2. 上海电力实业有限公司，上海 200001）

摘要：针对目前变电站人工核对相序中存在的人员安全性不足、检测质量可靠性不佳的缺陷，提出了一种基于图像识别的变电站核相验电操作机械臂。该系统由运动平台、机械臂系统和软件算法部分组成。运动平台是履带式地面自主循迹运动平台，依靠图像识别进行室内定位和运动控制。该系统包括一套能够操作核相仪进行核相验电操作的机构装置，以及一套软件系统能够获取数据、图像识别和控制机械臂操作等。经过实际运行测试，表明所设计的机械臂系统能够准确完成任务，在保障人员安全的同时提高工作质量。

关键词：核相验电；电力系统；智能巡检；图像识别；机械臂

Research on operation manipulator of substation phase verification based on image recognition

SHEN Jianzhong[1], SUN Lei[2]

(1. China Shanghai Municipal Electric Power Company North Power Supply Company, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai Power Industrial & Commercial Co., Ltd., Shanghai 200001, China)

Abstract: Aiming at the defects of insufficient safety of personnel and poor reliability of detection quality in the manual phase sequence check of substation, A kind of substation phase check operation manipulator based on image recognition is proposed. The system consists of motion platform, manipulator system and software algorithm. The motion platform is a tracked autonomous tracking motion platform, which relies on image recognition for indoor positioning and motion control. The system consists of a set of mechanism which can operate the phase detector for phase verification and a set of software system which can obtain data, image recognition, control manipulator operation, etc. After the actual operation test, it shows that the manipulator system designed in this paper can accurately complete the task, ensure the safety of person and improve the quality of work at the same time.

Key words: phase verification; power system; smart round-inspection; image recognition; manipulator

0 引言

变电站是国家电网的核心控制枢纽，随着国家经济的发展，电力系统的复杂度越来越高，对电力系统的稳定性要求越来越高，对变电站的巡检和维护也越来越重要。目前电网的

巡检方式主要包含两种：分别是人工巡检和机器巡检。随着电网系统的不断发展，电力系统的自动化程度越来越高，普通的人工巡检已经难以满足电网的要求，针对变电站的巡检机器人也应运而生。传统人工巡检方式危险系数非常高，而且成本极高，劳动强度大，工作单调乏味，因此工作人员的效率较低；并且由于人工巡检判断与工作人员的工作经验、工作状态等直接相关，偶尔会发生漏判和误判等情况，造成较大的经济损失[1-2]。

目前的巡检机器人发展迅速，它能依靠自身搭载的红外成像设备、摄像机、测试仪器和机械臂等装置，结合图像识别技术，自主检测变电站内设备和部件的工作情况。同时它也可以将采集到的数据及时反馈到主机之中，方便工作人员实时监测变电站工作情况。变电站巡检机器人的应用可以大大提高电力系统的维护效率，保障工作人员的安全。

核相就是核对相序，是为了保障发电机和电动机的正常工作。在发电并网前必须做核对相序的试验，如果相序不对则发电机无法入网，强行并网会造成设备损坏，后果非常严重。因此，在新建、改建发电站或者主设备大修时，核对相序是必须并且经常做的操作。而目前国内核相操作主要采用有线方式，整个操作需要四人进行：一人担任指挥；两人穿绝缘鞋，带绝缘手套核相；一人读表记录。可以看到操作非常烦琐，人员成本较高，危险性较大，同时人为失误导致的风险增加[3]。

图像识别技术在世界范围内发展迅速，图像识别算法搭配良好的摄像头能够快速搭建智能视频监控系统。在本系统中采用的图像识别系统能够识别核相点位，通过采集的数据对机械臂的核相验电操作进行控制。

针对上述目前变电站核对相序中人工巡检存在的弊端，结合新兴的图像识别技术，提出基于图像识别的变电站核相验电操作机械臂，以提高在核相验电过程中的工作稳定性，减少安全隐患，降低人员费用，提高工作效率。

1 系统整体方案

1.1 机械臂系统的总体结构

电力核相验电过程中，考虑到电力系统中常常配有很多发电设备，需要经常在不同设备之间移动，所以为了适应不同变电站的空间位置，机械臂系统需要能够在不同设备之前移动，所以装备有履带移动装置可以让机械臂移动。为了能够配合不同高度的装置，机身需要搭载升降系统来控制机械臂末端的操作高度。同时为了能够使得机械臂在核相验电过程中可以精准定位，需要在机械臂末端安装摄像头，通过对验电过程中图像的采集，可以利用图像识别算法保证末端的触头能够准确地接触到核相点。

基于上述核相验电机械臂的基本需求设计机械系统，基于图像识别的变电站核相验电操作的机械臂系统主要包括履带、机器人主体、升降装置、水平运动机构、末端支架和各种所需要的传感器。整体方案如图 1 所示，可实现核相验电操作、采集数据、核相点识别和路线规划功能。

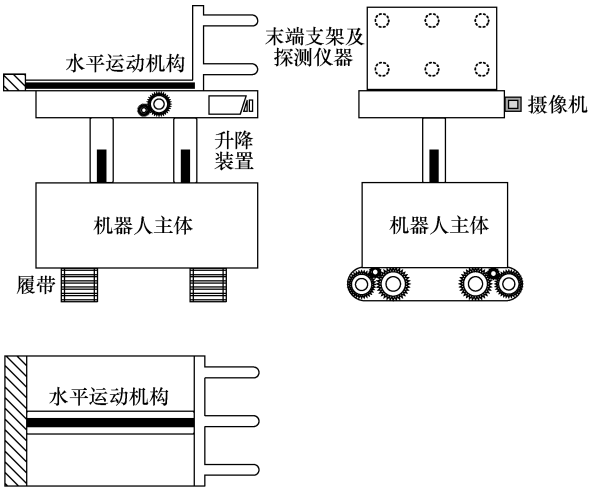

图 1 机械臂系统的总体结构

Fig. 1 Overall structure of manipulator system

1.2 机械臂系统组成

如图 2 所示，基于图像识别的变电站核相

验电操作机械臂主要由核相验电机械臂综合检测中心和嵌入式控制单元所组成，两者中间通过相对应的通信模块完成数据的交换和指令。

核相验电机械臂综合检测中心是整个核相验电的操作过程中的主要部分，包括 CPU、GPU、显示器、电源和图像传感器等部分。操作人员主要通过触摸屏对整个综合控制模块进行交互操作和对结果进行查看；电源管理部分负责对整体供电电池的充放电管理和电源的稳压输出；图像传感器负责配合相应的算法进行定位；通信模块部分则负责对传输的数据和指令进行解析、编码、压缩和传输等。

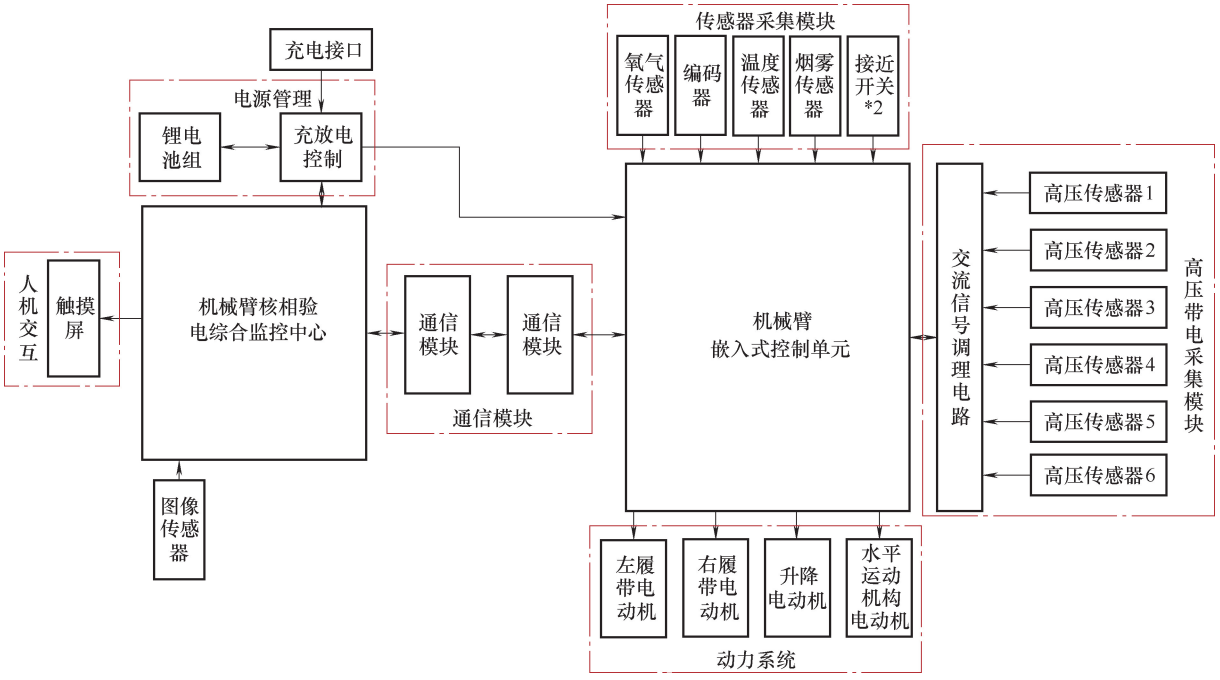

图 2　机械臂系统的组成

Fig. 2 Composition of the manipulator system

机械臂嵌入式控制单元主要完成对工作过程的直接控制，其整体的结构构成主要有通信模块、传感器采集模块、高压带电采集模块和动力系统。传感器主要是用来对环境变量进行检测，保障工作过程中工作人员和设备的安全，包括温度传感器、烟雾传感器等；动力系统主要包括对履带、升降机构和水平运动机构的电动机的控制，通过控制电动机的运动使得机械臂系统到达正确的位置，也使得末端的核相验电触头能够准确对齐，它和图像传感器形成了一个位置控制的闭环系统；核相验电采集部分主要是 6 个核相触头，其中每 3 个为一组，用于采集来自不同的三相电的相序等信息，并把它传输给控制系统进行相应处理。

1.3　核相验电机械臂工作流程

在核相验电机械臂起动后，工作流程如图 3 所示。第一步，要根据所需要核相验电的变电站开关柜的位置，由操作人员通过触摸屏控制该核相验电机械臂运动到指定目标变电站开关柜前；第二步，工作人员通过触摸屏对机械臂输入执行核相验电指令，之后图像传感器配合控制算法控制升降装置、履带装置水平移动装置，使得 6 个核相触头与 6 个待核相的触点在位置上相对应；第三步，机械臂根据控制算法操作水平运动装置，将末端传感器伸入到开关柜内部，使得 6 个核相点互相接触，然后由机械臂嵌入式控制单元来采集和传输 6 个核相点的数据，并由核相验电机械臂控制系统综合控制模块处理并且输出结果；第四步，在执行完上述操作后，可以根据实际工况，通过路径规划使得该系统运动到下一个工作地点或者停放地点。

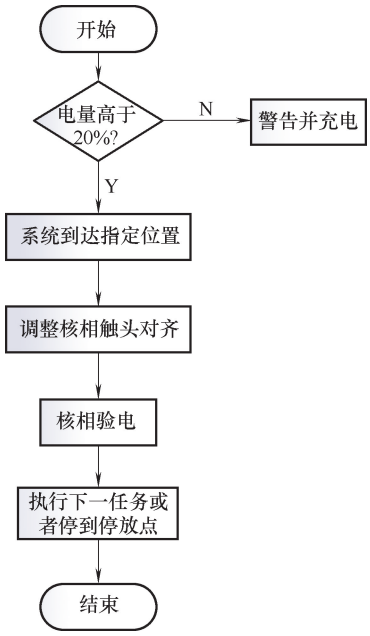

图 3 机械臂系统的工作流程图

Fig. 3 Work flow chart of manipulator system

在日常使用过程中，该机械臂系统在运行前应该停放在指定位置，并且在起动后可以检查电池电量，保障工作续航，在电池电量低于20%时产生警告并且进行充电。

2 硬件控制系统设计

2.1 核相验电机械臂综合控制模块硬件方案

核相验电机械臂综合检测中心是整个核相验电的操作过程中的主要部分，包括计算机、显示器、电源和图像传感器等部分。

在计算机硬件配置上选择 CPU 为 I3-6100，主板选择 AIMB-285，搭配 8 G 内存和 256 G 硬盘存储，能够为系统的运行提供足够的计算能力。触摸显示屏是该核相验电机械臂系统的主要人机交互方式，同时向工作人员显示工作信息和接收来自工作人员的输入信息，考虑到该系统的大小和实际工作情况，选择 EYOYO 11.6 英寸工业触控宽屏显示器，该显示器分辨率为 1 920×1 080，支持 HDMI、VGA 接口和嵌入式安装，能够满足需求。由于该机械臂需要在不同设备之间移动，所以电源系统采用蓄电池供电方便移动，同时为了减少充电次数和增加续航，选择两个 12 V、40 A·h 的大容量锂电池供电，其中一个电池专门给履带系统供电。为了避免电池供电产生的电压波动问题，需要在电池的输出端增加稳压模块，同时由于不同设备所需的恒定电压不同，要针对性地采用电压转换模块。例如针对系统中的水平运动机构和升降机构，需要使用 12 V 转 48 V 的电压转换装置；而在机械臂的嵌入式控制单元中，对于控制单元需要 12 V 转 3.3 V 的转换装置。图像传感器采用 500 W 物理像素的工业图像传感器，其分辨率最大可达到 2 952×1 944，使用寿命可达 70 000 h，支持 Windows 系统，免驱动可直接使用，满足图像采集的需要。

2.2 核相验电机械臂嵌入式控制单元硬件方案

机械臂嵌入式控制单元的硬件部分主要包括支撑平台、6 个核相触头、水平运动机构、图像传感器和水平运动机构。为了能够检测水平运动机构的位置，在水平运动机构的导轨上布置光电开关。图像传感器安装在 6 个核相触头的中央补位，保证画面不会受到遮挡。

系统的嵌入式控制单元的主要功能是在核相验电开始之前控制机械臂末端到达合适的位置，以及在核相验电过程中获取 6 个核相触头采集的高压交流电信息，并将相关信号发送到系统的总和控制模块进行数据处理。首先由于电源电压为 12 V，而嵌入式模块的工作电压为 3.3 V 和 5 V，所以需要电压转换模块。

为了满足工作需求，同时满足在工作过程中对环境进行检测，控制芯片选择意法半导体 ARM 架构的 STM32F429IGT6 芯片作为主要的控制芯片。该芯片采用 Cortex-M4 内核，其最高主频可达 180 MHz，具有 176 个引脚，3 个 12 位的 ADC 共有 24 个通道，最多可有 8 个串口。作为一款高性能、低成本和低功耗的嵌入式处理器，完全满足需求。

关于步进电动机和直流电动机，在水平运动机构上采用 48 V 直流电动机，搭配两个继

电器控制电动机的正反转，输出的转矩约为6 N·m；而在履带和升降部分，考虑到对运动准确度的需求，采用86步进电动机并搭配DMA860H驱动器和光耦进行控制，采用LSR60精密行星减速机减速，理论上可至少达到12 N·m的输出转矩。

AD芯片需要能够对至少10路模拟量进行转换，所以选用AD7606芯片，这是一款低功耗、高速度和电荷再分配逐次逼近型模数转换器，采用单电源供电，片内具有滤波和高输入阻抗，无须驱动运算放大器和外部双极性电源，是电力系统中最常用的采样芯片，性能上完全满足系统的六路电压信号同步采集的需求。

最后也是最核心的硬件是高压传感器。高压传感器主要负责的是与变电站中的核相触电相接触，并且通过内部的电路采集到相应的电压信号。选择的高压传感器可以采集的电压为10 kV，最大允许通过的电流为1 250 A，在其内部有一个115 pF的电容与触头相连接，电容的另一端为传感器输出端。与其配合的高压电信息采集电路主要为高压信号的分压电路，如图4所示，传感器内部有一个电容为C_1，引出后串联着一个电容C_2。其中C_1和C_2之间的点位待测点通过ADC后连接到嵌入式芯片进行数据采集，C_2的值可以通过分压原理获得，即两个串联的电路其内部电荷量相等，由此就可以通过设置C_2的电容大小来将高压电降低到合适的范围内进行测量。例如在C_2处安装的电容为C_1处的1 000倍，就可以把高压电降低到10 V左右。

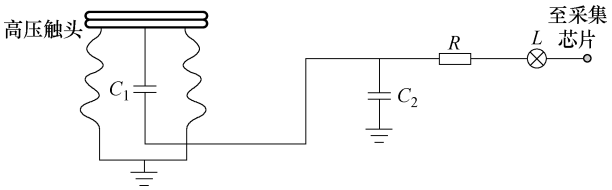

图4 高压信号分压电路

Fig. 4 High voltage signal voltage divider circuit

3 软件控制系统设计

3.1 概述整体软件系统

基于图像识别的变电站核相验电操作机械臂的软件系统主要包括核相验电机械臂综合监控软件和机械臂嵌入式系统软件两个部分组成，这两套软件之间相互配合，共同完成核相验电的整个操作过程。

3.2 核相验电机械臂综合监控软件

核相验电机械臂综合监控软件主要是对整个机械臂系统运行状况进行监控和管理，例如电池电量管理，从而保障机械臂运行的安全和稳定，是机械臂的重要辅助功能部分。

根据功能要求，核相验电机械臂综合监控软件结构如图5所示，采用平行结构，根据核相验电机械臂综合监控软件不同的功能分类，分别为电源管理单元、串口通信单元、安全管理单元、人机交互单元和高压电信息计算处理单元。其中电源管理主要负责对系统的电源进行管理，对电池电量进行计算，在电池电量不足时进行提醒。串口通信单元主要负责该核相验电机械臂综合软件的数据传输和指令控制的传输。安全管理单元主要负责对核相验电机械臂的运动过程进行监控，记录机械臂的运行情况，保障机械臂的运行安全，以防止设备在运动过程中发生干涉，保护设备和人员安全；同时安全管理单元也包括在该机械臂系统上安装急停按钮，可以在突发情况时紧急停止并关闭设备，保障工作安全，减少人员和设备损失。人机交互单元是工作人员和机械臂进行交互的主要单元，机械臂的综合监控软件系统通过该单元获取来自操作人员的操作指令，并通过该单元把核相验电过程中的数据和结果显示在屏幕上。高压电信息计算处理单元是综合监控软件的核心部分，主要负责将来自串口通信单元的高压电数据通过相应算法进行处理，计算6个不同高压交流电的幅值和相位信息，然后将结果通过人机交互单元进行显示。

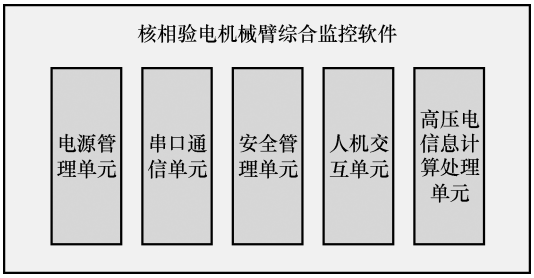

图 5 核相验电机械臂综合监控软件框图

Fig. 5 Block diagram of comprehensive monitoring software for phase verification manipulator

3.3 核相验电机械臂嵌入式控制软件

核相验电机械臂嵌入式控制软件主要是对机械臂末端的元器件进行控制，例如操作机械臂末端的高压传感器对准核相验电触头，所以是机械臂工作时的核心控制中心。

根据其功能要求，核相验电机械臂嵌入式控制软件结构如图 6 所示，根据功能将该软件分为五个主要部分，分别为串口通信模块、传感器信息采集模块、高压电信息采集模块、安全管理模块和运动控制模块。其中各个模块各司其职，串口通信模块用于实现和核相验电机械臂综合监控软件的通信，可以进行数据传输和接收来自工作人员输入的指令。传感器信息采集模块为一个整体，包括安装在机械臂末端的氧气传感器、温度传感器和烟雾传感器在内的各种传感器，这个模块主要负责控制这些传感器进行数据采集，并且发送数据，从而实现对机械臂工作环境的监控。安全管理模块是保障工作人员和机械臂工作安全的重要部分，结合传感器信息采集模块收集的信息，根据接收的数据来对机械臂的工作环境和工作情况进行监控，保障人员和设备的安全。运动控制模块负责控制机械臂上各个电动机的运动，将工作人员输入的指令转换为控制指令，从而使得机械臂到达指定位置执行任务。高压电信息采集模块是该机械臂的核心采集信号部分，主要负责控制机械臂末端的 6 个高压传感器采集高压电信息，实现主要功能。其中主要依赖机身搭载的摄像头进行图像识别，从而控制核相触头准确对齐，原理为在调试阶段先通过摄像头采集到不同机柜中核相触头的放置位置和角度的图片，通过对大量图片的处理建立模板库；在机械臂运行时通过摄像头采集的图像数据和模板库进行对比，控制电动机运动调整机械臂上触头的位置[4]。

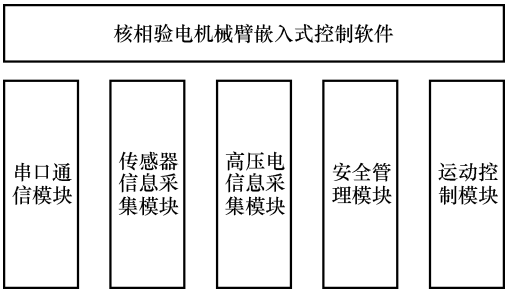

图 6 核相验电机械臂嵌入式控制软件框图

Fig. 6 Embedded control software block diagram of phase verification manipulator

该软件使用 C 语言进行开发，开发软件选择 KEIL MDK5，采用了现有的库函数编写，结构上采用模块化方式，有利于软件功能的维护和拓展。

3.4 核相验电机械臂图像识别

核相验电机械臂图像识别部分是整个系统的核心部分，图像识别的准确率和速度直接影响了核相验电的端口能否正确对接，关系到整个系统的正常运行。

图像识别技术自从 20 世纪中期诞生以来，随着图像采集设备、图像处理算法以及计算机能力的提升有了巨大的进步，利用智能摄像系统通过摄像机采集的图像信号来对系统进行控制，使得系统更加智能和稳定。图像识别技术主要包括四个方面，分别为图像预处理、图像分割、图像特征提取以及图像匹配，如图 7 所示。本系统中也将利用到图像识别的技术来对机械臂核相验电过程中核相端口的位置进行追踪，保证端口能够正确对接。

本系统中的图像识别部分主要是通过 OpenCV 库中的算法实现。首先是对通过图像

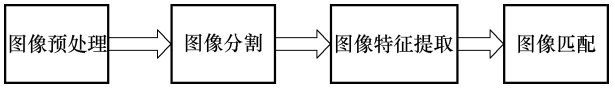

图 7　核相验电机械臂图像识别框图

Fig. 7 Image recognition block diagram of phase verification motor manipulator

传感器采集到的信号计算图像的 Haar-Like 特征的积分图。Haar-Like 特征最早起源于 1998 年，针对图像识别定义了四个基本结构，用来遍历描述整个图像。积分图是使用 Haar-Like 特征时常用的算法，可以只遍历一次图像就计算出所有区域的像素和，可以大大提高图像特征提取的计算效率。积分图的构造方式是令位置（i，j）处左上角的全部像素和为 Integral（i，j），具体构造方式如下：

1）用 Sum（i，j）表示当前行方向的像素累加和，初始化 Sum（i，-1）$=0$。

2）用 Integral（i，j）表示像素位置（i，j）处左上角的全部像素和，初始化 Integral（-1，j）$=0$。

3）对采集到的图像进行逐行扫描，递归计算每个像素位置（i，j）的行方向的累积 Sum（i，j）和积分图像 Integral（i，j）：

$$\mathrm{Sum}(i,j)=\mathrm{Sum}(i,j-1)+I(i,j)$$

$$\mathrm{Integral}(i,j)=\mathrm{Integral}(i,j-1)+\mathrm{Sum}(i,j)$$

4）遍历扫描图像，到达图像右下角最后的像素后停止。

在通过计算得到图像的 Haar-Like 积分图之后，由于计算方法的特性会产生大量的数据，不利于分析，例如一个 24×24 的检测器，在计算 Haar-Like 特征后会产生超过 16 万个矩阵，所以必须有算法能够从这大量的矩阵中筛选出合适的特征矩阵，才能够使得图像识别可行。

本系统使用 AdaBoost 算法。AdaBoost 是 Boosting 算法中的一种。Boosting 算法通过定义一个方法能否大量提升判断的准确率，将不同的方法分类为强学习和弱学习。AdaBoost 算法的特点就是能够根据弱学习的结果来调节设定的错误率，不需要弱学习器性能的知识，效率较高。同时 AdaBoost 算法也是一种基于级联分类模型的分类器，其流程如图 8 所示，级联分类模型由多个强分类器连接在一起操作，而强分类器由多个弱分类器加权组合在一起。级联分类模型的特点是当强分类器检测到负样本后，就可以不用继续调用下面的分类器直接跳过，减少了很多检测时间。而图像识别过程中，在图像中的大部分非检测区域在经过初期的强分类器后都会产生负样本，这样在分类器初期就筛选掉了大部分情况，大大减少了运算时间。同时由于只有正样本会被往后输送，所以后续的分类中出现负样本的几率也大大减少，提高了效率。

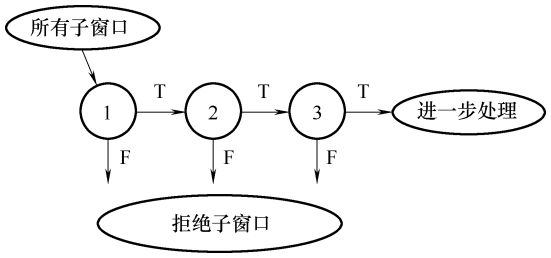

图 8　级联分类模型

Fig. 8 Cascade classification model

AdaBoost 算法的原理如图 9 所示。

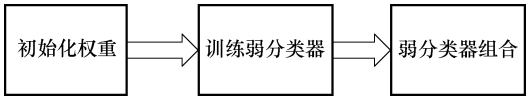

图 9　AdaBoost 算法原理

Fig. 9 Principle of AdaBoost algorithm

其中初始化权重具有 N 个样本，则每个样本的权重为 $1/N$。第二步训练弱分类器时，如果样本已经被准确分类，则下一次训练权重降低；如果还没有准确分类，则训练权重提高。第三部弱分类器组合中，要将弱分类器组合成强分类器，其中分类误差率小的分类器权重更大。具体算法如下所示：

1）初始化训练数据的权重，D_1 表示第一次迭代时每个样本的权重，w_{1i} 表示第 1 次迭

代时第 i 个样本的权重，各表达式为

$$D_1=(w_{11},w_{12}\cdots w_{1i}\cdots,w_{1N})$$

$$w_{1i}=\frac{1}{N}$$

$$i=1,2,\cdots,N \tag{1}$$

2）计算弱分类器，其中 $G_m(x)$ 表示弱分类器，将样本分成 1 或者 -1。e_m 计算表示弱分类器的误差函数。

$$G_m(x):x\rightarrow\{-1,+1\}$$

$$e_m=\sum_{n=1}^{N}w_n^{(m)}I(y_m(x_n)\neq t_n) \tag{2}$$

3）计算弱分类器 $G_m(x)$ 的权重

$$\alpha_m=\frac{1}{2}\log\frac{(1-e_m)}{e_m} \tag{3}$$

4）更新权值分布，其中 D_m+1 表示下一次迭代时的样本总体权重，$w_{m+1,i}$ 表示下一次每个样本各自的权重，各表达式为

$$D_{m+1}=(w_{m+1,1},w_{m+1,2},\cdots,w_{m+1,i},\cdots,w_{m+1,N})$$

$$w_{m+1,i}=\frac{w_{mi}}{Z_m}\exp(-\alpha_m y_i G_m(x_i)),i=1,2,\cdots,N \tag{4}$$

其中 Z_m 为归一化因子，使得所有样本的权重之和为 1，计算公式为

$$Z_m=\sum_{i=1}^{N}w_{mi}\exp(-\alpha_m y_i G_m(x_i)) \tag{5}$$

5）组合弱分类器，然后加上 sign 函数用于求样本的正负，即

$$f(x)=\sum_{m=1}^{M}\alpha_m G_m(x) \tag{6}$$

$$G(x)=\mathrm{sign}(f(x))=\mathrm{sign}(\sum_{m=1}^{M}\alpha_m G_m(x)) \tag{7}$$

通过上述算法对图像的特征提取和分类后，可以实现图像识别功能，正确识别电气柜中核相触点的位置，保证核相验电操作的准确性。

4 结束语

本文主要针对变电站核相验电操作安全系数不高、人员成本过高和效率较低等问题，结合了新兴的图像识别技术，提出了基于图像识别的变电站核相验电机械臂系统，包括机械臂硬件、电路硬件和操作软件。为了验证本文提出的硬件方案和软件系统，根据本文研制了样机，并且在模拟变电站环境中进行了测试，结果样机可以正确地进行寻路、运动、核相验电操作和数据传输，工作正常。因此该系统可以大大降低变电站进行核相验电操作时的成本，同时提高了工作效率，降低了工作人员的劳动强度和危险系数。同时该系统可以通过更换机械臂末端的传感器来进一步拓展功能，应用前景非常广泛。**EA**

参 考 文 献

[1] 杨旭东，黄玉柱，李继刚. 变电站巡检机器人研究现状综述 [J]. 山东电力技术，2015 (1)：30-34.

[2] 何靖玲，吴一波，朱国军，等. 核相验电一体化小车的研制 [J]. 集成电路应用，2019，36 (12)：78-79.

[3] 张金波，胡钢，张学武，等. 一种实用的新型高压无线核相装置的设计 [J]. 计算机测量与控制，2005 (1)：45-46，64.

[4] 尹雁和，贾子然，曾毅豪，等. 变电站巡视中的图像识别技术应用 [J]. 通信电源技术，2020，37 (3)：147-148.

作者简介

沈建忠

沈建忠 (1973—)，男，高级工程师，主要研究方向为电力系统。

(收稿日期：2021-03-28)