

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.08.009

## 输电线路防外力破坏智能预警系统研究

张 焱, 黄新波, 陈小雄, 周柯宏, 张 菲

(西安工程大学电子信息学院, 西安 710048)

**摘要:** 针对输电线路外力破坏引起的跳闸事故频繁发生这一日益突出的问题, 笔者提出了一种输电线路防外力破坏智能预警系统的整体构思, 并在现场测试安装该系统运行良好。该系统以TI-TMS320DM6446芯片作为处理器, 完成周边模块的配置以及视频监控系统的设计; 采用高斯混合模型、背景差分 and 最小外接矩形等算法实现对云台摄像机捕捉的运动目标进行检测和标识, 并给出预警信息。现场运行表明, 该系统效果显著, 实时性强, 在防止输电线路外力破坏方面起到了积极的作用。

**关键词:** 预警; 输电线路; 外力破坏; 混合高斯模型; 背景差分法

### Intelligent Early-warning System for Preserving Transmission Line from External Damage

ZHANG Ye, HUANG Xinbo, CHEN Xiaoxiong, ZHOU Kehong, ZHANG Fei

(College of Electrics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To preserve the transmission line from frequent tripping accidents caused by external damage, an intelligent early-warning system was designed and implemented. TI-TMS320DM6446 was taken as its processor, combining with a peripheral module and a visual monitoring device. The Gaussian mixed model (GMM), the background subtraction method and the MER method were used for moving target detection and identification, and the early warning information was hence given at the same time. Field test demonstrated the remarkable effectiveness and real-time performance of the system in preserving transmission line from external damage.

**Key words:** early warning; transmission lines; external damage; GMM(Gaussian mixture model); background difference

## 0 引言

由于输电线路具有路径较长、周边地形条件复杂、区域跨度较大、受环境气候影响大、巡视周期较长等特点, 极易遭到外力的破坏。目前常见的电力设施外力破坏主要有违章施工、违章建筑物、高杆植物、飘浮物、山火及鸟害等形式<sup>[1-2]</sup>。加之近年以来, 全国各地的工程建设增多, 各种高速铁路、公路的兴

建, 大型机械线下施工不断, 加上个别的违章房屋、采石场、矿场等建筑物, 均在线路保护区内悄悄建起, 使得外力破坏跳闸的事件屡屡发生, 导致输电线路的破坏情况大量增加。据统计, 全国近三分之一的停电事故都是由外力破坏电网引起。诸如, 线下大型机械施工、塔吊撞线、树木碰线、异物绕线等外力破坏引起的大面积停电、断线、倒塔事故不仅给当事单位个人带来生命财产的损失, 也给供电部门的日常生产带来严重影响, 又由于这些外力破坏事件的发

收稿日期: 2015-03-21; 修回日期: 2015-04-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(51177115); 陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-16); 陕西省输变电设备状态监测工程技术研究中心项目(陕科计发[2012]214号); 西安市技术转移促进工程-高校院所服务企业项目(CXY1428(3))。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51177115), Key Science and Technology Innovation Team of Shaanxi (2014KCT-16), Shaanxi Research Center of Condition Monitoring of Power Transmission and Transformation Equipments ([2012]214), Xi'an Technology Transfer Promoting Project -Project of Universities and Research Institutes Servicing Enterprises (CXY1428(3)).

生具有随机性、隐蔽性、突发性的特点,使供电部门日常巡视难以达到理想的管理效果<sup>[3]</sup>。

笔者所介绍的一种输电线路防外力破坏智能预警系统,其目的在于有效减少或消除外力破坏情况的发生,更好地维护电网的安全运行,进一步提高输电线路安全运行和智能化管理水平<sup>[4-5]</sup>。

## 1 系统的总体设计

输电线路防外力破坏智能预警系统,通过云台摄像机采集现场图像,经视频采集模块进行模数转换,将数字视频图像信号传输到视频处理模块进行分析处理,当输电线路现场有异常情况发生时,智能视频监测分机将现场情况通过 OPGW/光纤+WIFI 或者 3G 网络等方式发送到后台监控中心<sup>[6-7]</sup>。监测

分机的主控板主要由 ARM+DSP 构成,其中 ARM 为主要控制芯片,视频图像采集处理模块通过 SIP 协议与其进行通信,将采集到的视频信息传给 ARM 端,ARM 再调用 DSP 中的视频差异化算法,来分析采集的现场图片,如果分析结果显示有大型机械靠近、行人爬塔等人为破坏发生时,程序可以联动喊话器对可疑人员进行告警<sup>[8]</sup>,同时,后台监控中心彩信平台将收到的现场报警信息以彩信形式实时发送给工作人员,Web 服务器将信息同步到用户 PC 机端,用户还可以通过手机登陆系统服务器再次查看。考虑到视频监测分机安装于户外,存在取电困难问题,所以采用风光互补加蓄电池供电系统,在设计中对充放电电路采用了保护设计,系统的总体设计图见图 1。

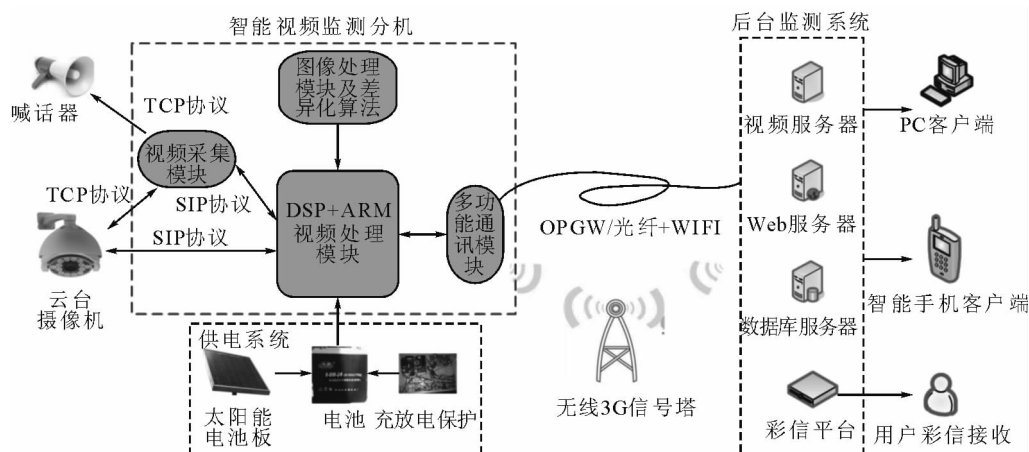


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 The overall structure of the system

## 2 视频监测分机设计

智能视频监测分机采用模块化设计,总体包括视频采集模块、视频处理模块、通讯模块和电源模块等。云台摄像机采集来的模拟视频信号经过视频采集模块解码成数字信号后,送给视频处理模块进行分析处理,其中嵌有相关差异化算法,当分析判断出输电线路现场有危险时,通过 OPGW/光纤+WIFI 或者 3G 网络,将报警信息发送到后台监控中心及工作人员的手机上。整体的硬件框架见图 2。

### 2.1 云台摄像机

摄像机是文中提出的防外力破坏智能预警系统的最前端装置,其拍摄效果直接关系到智能视频分析部分识别算法的难易和计算结果的准确度,因此摄像机的选取对于系统至关重要。结合该系统的应用特点,笔者采用带云台的可见光模拟摄像机,实现 24 h 不间断监控(可控),采用二自由度云台实

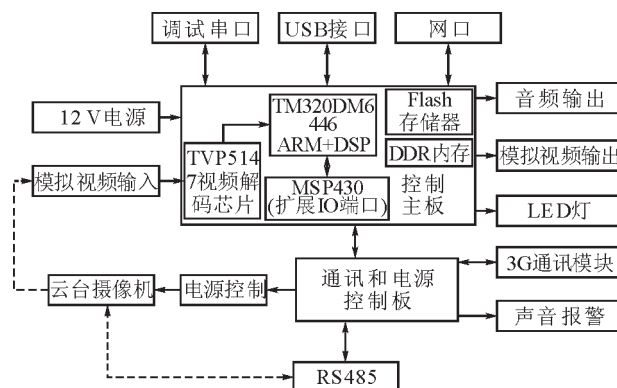


图 2 视频监测分机硬件框架图

Fig. 2 Hardware frame diagram of the monitor

现全方位监控,可调节摄像机的预置位、焦距、光圈等参数实现高质量的视频采集。

### 2.2 视频采集模块

视频采集解码模块采用 TI 公司生产的 TVP5147 视频解码芯片<sup>[9]</sup>,它将云台摄像机采集来的模拟视频信号转换为 YUV4:2:2 格式,然后送到 DM6446

视频前端进行处理传输。

### 2.3 视频处理模块

视频处理模块采用 TI 公司的达芬奇架构 TMS320DM6446 芯片。主要完成对视频采集模块传来的数字视频信号做进一步分析处理存储以及传输,结合 ARM 调用 DSP 中的视频差异化算法做进一步分析,并对分析完的数据进行数据编码压缩处理,也可以存入硬盘。存储模块主要包括连接在 DDR2 控制器上的 DDR2 存储器和连接到外部存储器接口 EMIFA 的 SRAM、NOR/NAND Flash 等。其中 DDR2 存储器是整个 DM6446 系统的缓冲中心。系统代码运行、图像数据搬移等都要使用 DDR2。NAND Flash 主要用于存储启动代码和数据,也可以存储文件系统等信息。

### 2.4 电源模块

电源模块采用风光互补供电系统<sup>[10]</sup>,主要包括风力发电机、太阳能板、电源充放电控制电路、电流电压采集、加热电路等 5 部分,见图 3。其中对蓄电池的充放电进行了保护电路设计:充电时,当蓄电池的电压达到上限,保护电路则停止对蓄电池充电以防止电池充爆;放电时,当蓄电池电压低于下限阈值,保护电路则停止放电,以防止蓄电池亏损。另外,供电系统配置有加热功能,当冬季到来时外界温度达到设定温度值以下且蓄电池电量充足的情况下,多余的太阳能或者风能<sup>[11]</sup>就会给整个系统加热,保证蓄电池的质量及放电效率。

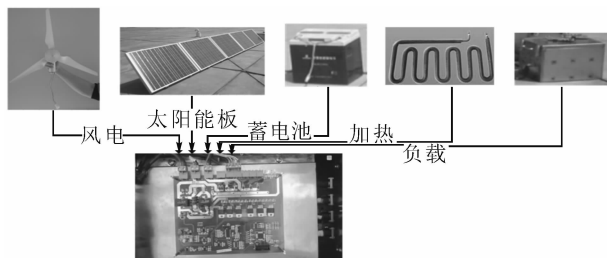


图 3 风光互补供电系统结构框图

Fig. 3 The structure diagram of wind-solar complementary power supply system

### 2.5 分机程序设计

智能视频监测分机程序设计包括两部分,一部分为 ARM 中的应用程序软件设计,另一部分即嵌入到 DSP 中的差异化智能识别算法部分的设计。通常 ARM 端负责设备的配置和控制,包括 DSP 子系统、VPSS 子系统以及大部分的外设和外部存储器<sup>[12]</sup>。VPSS 系统包括 1 个视频前端(VPFE)和 1 个视频后端(VPBE)。视频前端模块主要用于捕获视频信号,也可以直接从前端输入已有的视频信号。视频前端由 CCD 控制器、预览引擎、直方图模块和自动聚焦/

曝光/白平衡模块组成。视频后端由 OSD(on-screen display)引擎和视频编码 2 个主要模块组成,OSD 引擎可处理 2 个独立的视频窗口和 2 个 OSD 窗,也可将第 2 个视频窗叠加在第 1 个视频窗之上,实现画中画功能,OSD 用于在视频图像上叠加音量、图标等位图或图像信息。视频编码模块提供数字输出和模拟输出。视频流经解码芯片传给 ARM,ARM 调用 DSP 中嵌入的差异化智能识别算法,对现场传回的视频帧图片进行实时分析,再将分析结果回传给 ARM,由 ARM 经过 3G 模块或光纤等通信方式将数据发送到后台服务器上,再同步到专家软件图片库、Web 客户端,同时会将报警数据以彩信形式发到设定好的工作人员手机上。具体各模块之间的交互框见图 4。监测分机选用 3G 通信时 ARM 端的程序流程图见图 5。

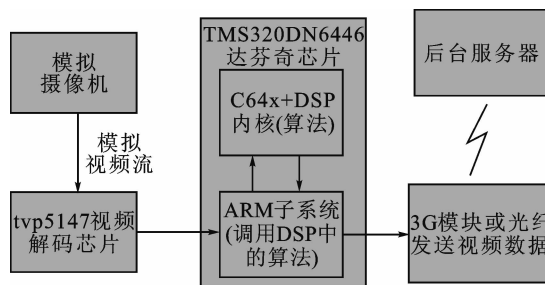


图 4 智能视频监控前端各模块交互框图

Fig. 4 The module interaction block diagram of intelligent video surveillance front-end

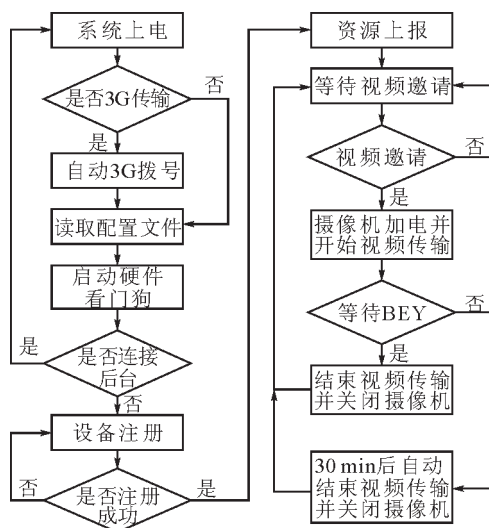


图 5 视频监测分机的程序流程图

Fig. 5 The program flow chart of video surveillance device

## 3 视频差异化算法设计

文中的智能识别算法嵌入在 DM6446 主控芯片的 DSP 中,主要涉及如何精确提取出现场图像中的

运动目标,即检测出图像序列中与运动对象相关的点,滤除图像中与运动对象无关的信息<sup>[13-14]</sup>。对运动目标的正确检测能大大提高后续跟踪识别和运动分析的正确率。

### 3.1 背景建模

文中采用混合高斯模型建立背景模型,为每个像素点建立一个自适应的混合高斯模型(gaussian mixture model, GMM)<sup>[15-16]</sup>。对每个像素定义  $K$  个状态,  $K$  一般取 3~5。每个像素值  $X_i$  是随机变量  $X$  的一个采样。 $X$  服从  $K$  个状态的混合高斯分布,第  $k$  个分布定义为

$$f_{x|k}(x|k, \theta_k) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_k|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu_k)^T \Sigma_k^{-1}(x-\mu_k)} \quad (1)$$

式(1)中:  $k \in (1, 2, \dots, K)$ ;  $\mu_k$  是均值向量;  $\Sigma_k$  是协方差矩阵。假设  $X_i$  的各部分是独立的,从而  $\Sigma_k$  变成一个对角阵,或者可以把对角元取相同的值  $\sigma_k^2$ 。每个分布都有一个对应的先验概率  $\omega_k$ ,  $\omega_k$  表示此分布对应背景的概率,满足  $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$ 。以  $\omega_k / \|\sigma_k\|$  的值对  $K$  个分布进行降序排列,满足式(2)的前  $B$  个分布代表背景,  $T$  是固定的阈值。GMM 背景建模方法可靠地处理长期的光照和场景变化。

$$B = \arg \min (\sum_{k=1}^B \omega_k > T) \quad (2)$$

对于一个新的像素,如果其像素值与其背景模型的前  $B$  个高斯分布中的某个分布匹配,则判定为背景,否则要判定为前景。然后对前景像素点进行连通域分析<sup>[14]</sup>,并滤掉小的连通域,就得到了前景运动目标。

式(2)中  $T$  是阈值,  $T$  的取值决定了背景分布个数。 $T$  取值太大或太小都将影响背景分布的正确估计,在实验中,其取值为 0.7。

判断像素块  $M$  是否属于运动目标,当  $M$  的灰度值  $\bar{X}_{N+1}$  与前  $B$  个高斯分布中某个匹配时,认为  $M$  为背景像素;当  $\bar{X}_{N+1}$  与后  $K-B$  个高斯分布匹配或与  $K$  个高斯分布都不能匹配,认为  $M$  为目标像素。

### 3.2 运动目标提取

背景图像生成后,需对当前帧中的运动目标进行提取。笔者采用背景差分法<sup>[17]</sup>,其原理如下:首先设  $B_k$  为背景图像,  $f_k$  为当前帧图像,差分图像为  $D_k$ ,则  $D_k(x, y) = |f_k(x, y) - B_{k-1}(x, y)|$ ,设  $R_k$  为差分后二值图像。对  $R_k$  进行连通性分析<sup>[18-22]</sup>,当某一连通的区域的面积大于一定的阈值,则认为检测的目标出现,并认为这个连通的区域就是检测到的运动目标图像。再进行相关的形态学后处理使目标对象更加精确。

$$R_k(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{背景 } D_k(x, y) \leq T_h \\ 1, & \text{前景 } D_k(x, y) > T_h \end{cases} \quad (3)$$

为设定的二值化阈值。具体根据检测对象的不同情况而设定。背景差分法的基本流程见图 6。

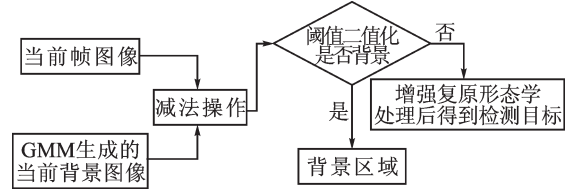


图 6 背景减法流程图

Fig. 6 Flow chart of background subtraction

### 3.3 运动目标标识

通过阈值化方法检测出物体后,下一步就要对物体进行识别和定位。由提取出的运动目标可得到物体的边界,用其外接矩形的尺寸来刻画它的基本形状是最简单的方法。如果仅计算其在坐标系方向上的外接矩形是很简单的,只需计算物体边界点的最大和最小坐标值,就可得到物体的水平和垂直跨度。但通常需要计算反映物体形状特征的主轴方向上的长度和与之垂直方向上的宽度,这样的外接矩形是物体最小的外接矩形 (minimum enclosing rectangle, MER)<sup>[23]</sup>。计算 MER 的一种方法是将物体在  $90^\circ$  范围内等间隔地旋转,每次记录其坐标系方向上的外接矩形参数,取其面积为最小的矩形的参数为主轴意义下的长度和宽度,见图 7。通常主轴可以通过矩(moment)的计算得到,也可以用求物体的最佳拟合直线的方法求出。

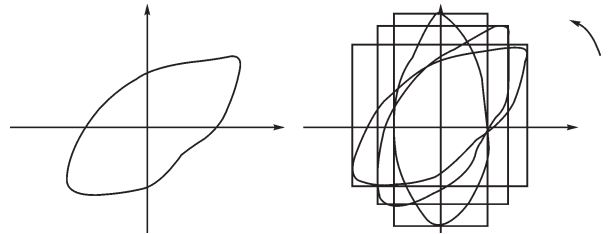


图 7 最小外接矩形示意图

Fig. 7 The minimum enclosing rectangle sketch

在求取目标物的最小外接矩形过程中也可结合目标物的长宽比进行筛选,滤除干扰的非目标物,区域的最小外接矩形的长与宽之比特性:①正方形和圆的体态比等于 1;②细长形物体的体态比大于 1。对于塔下人体目标检测,由于人体接近长方形,一般外接矩形的长宽比设为大于 1 的值,对于线下大型机械的外接矩形长宽比一般选择等于 1。

### 3.4 算法验证

为了验证文中算法的可行性,对在某废弃输电杆塔下拍摄的行人爬塔现场图像进行了分析处理,

标识出可疑爬塔行人。由于输电线路及杆塔常设在野外,现场环境容易受光照,天气因素的影响,线路杆塔周围都有树木或其他干扰因素,为了减少算法复杂度,只对感兴趣区域进行分析,并不进行全图分析,这样不仅提高了算法的效率,同时也除去了大部分干扰因子。一组现场测试时的分析图片见图8。

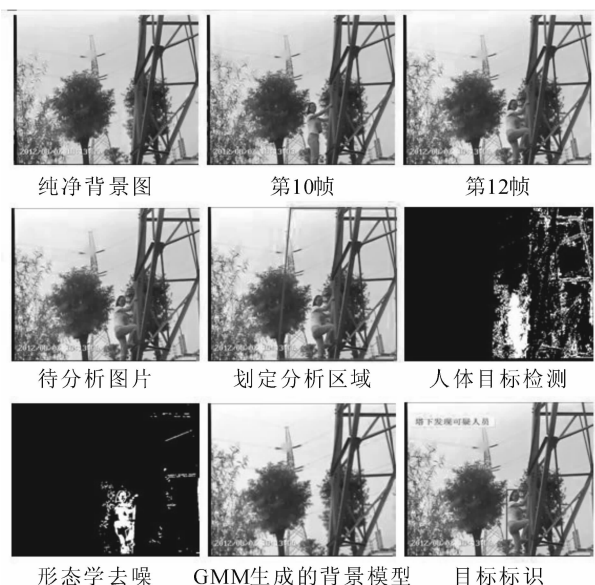


图8 一组分析过程图象

Fig. 8 A set of analysis process of the image

## 4 通信网络设计

通信网络负责将前端监测分机的分析结果传送到后台监控中心。通信方式主要有 GPRS/CDMA/3G/光纤/光纤+WIFI<sup>[24-25]</sup>等,输电线路防外力破坏智能预警系统在不同的应用场合下,可以将其中几种通信方式进行组合,从而实现数据传输。

### 4.1 GPRS/CDMA/3G 通信方式

GPRS/CDMA/3G 通信是监测装置利用现有的无线传输模块,通过公网或虚拟专用网络(APN)进行数据传输的一种通信方式,其网络结构图见图9。这种通信方式主要应用于现场没有光纤而 GPRS/CDMA/3G 网络比较好的情况下。

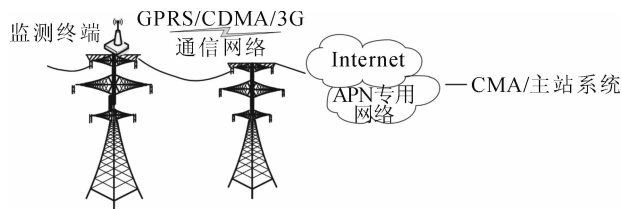


图9 无线通信网络结构图

Fig. 9 Wireless communication network structure

### 4.2 光纤/OPGW 通信方式

监测装置利用线路上已有的光纤进行通信(如OPGW),数据经由光纤交换机、接续盒、OPGW 光纤

进入变电站专网,最后进入线路所在管辖区的变电站通信系统。其网络结构图见图10。这种通信方式主要应用于现场 GPRS/CDMA/3G 网络比较差,但有光纤接续盒的情况下。

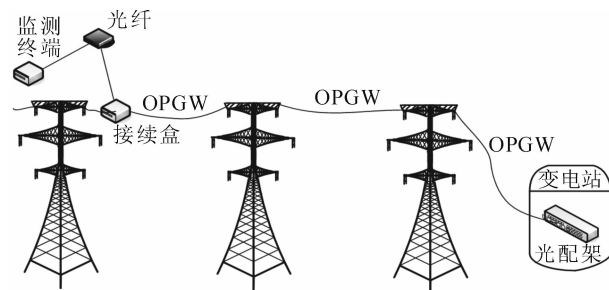


图10 光纤/OPGW 通信网络结构图

Fig. 10 Optical fiber/OPGW communication network structure

### 4.3 光纤+WIFI 通信方式

在现场没有光纤接续盒,并且 GPRS/CDMA/3G 通信很差的情况下,监测分机可以通过无线 AP 中继,将数据发送至有 OPGW 光纤接续盒的设备上,然后经由光纤交换机、接续盒、OPGW 光纤进入变电站专网,最后进入线路所在管辖区的变电站通信系统。其网络结构图见图11。

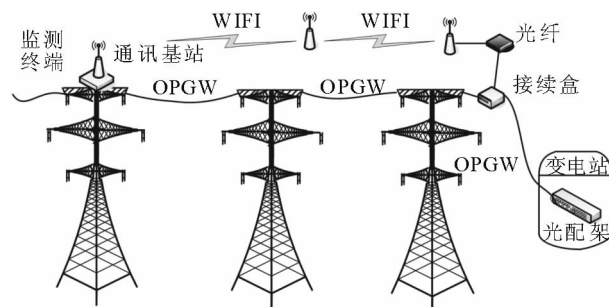


图11 现场通信网络结构示意图

Fig. 11 On-site communication network structure diagram

## 5 后台监控中心专家软件

软件系统共同分为两部分,防外力破坏专家分析系统以及 Web 输变电监控系统,分别见图12、13。部署在后台服务器上的专家分析系统收到前端采集终端生成的有针对性的报警信息后,将其进行存储,并转发推送至手持终端和 Web 查看客户端上,及时提醒相关工作人员。

### 5.1 PC 客户端软件设计

专家分析系统以及 Web 客户端的软件界面见图12。专家分析软件主要是用来接收摄像机拍摄的现场图象,以及存储分析结果。Web 查看客户端界面,有视频监控界面,可以实时查看现场情况,同时可以查看历史报警图象和分析过程。



图 12 专家分析软件界面

Fig. 12 The software interface of expert analysis software

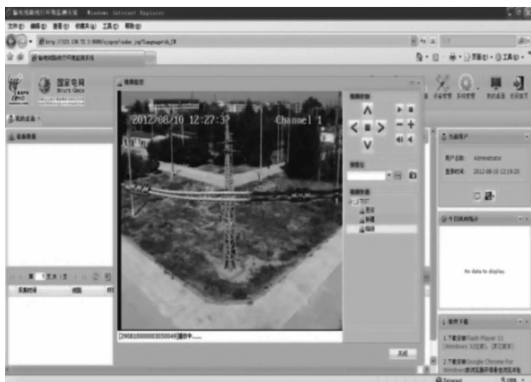


图 13 Web 客户端专家软件界面

Fig. 13 The Web client software interface

## 5.2 手机客户端软件设计

手机客户端软件主要功能包括:当监控现场发生异常情况而报警时,手持终端通过彩信服务实时接收监控结点抓拍到的报警画面,及时告知电力运行人员,以便采取相关措施。另外,该系统的手持终端还具有监控(支持 Android 系统 1.5 版本以上)作用,可以利用手机对现场情况、报警信息进行实时监控,见图 14。



图 14 彩信警示图

Fig. 14 Alarm MMS screenshots

工作人员可以通过设备列表选择关心的设备进行链接开始查看该设备视频和进行控制。图 15(a)为观看视频及控制界面,可通过触摸单击程序中的上、下、左、右、左上、右上、左下、右下进行对远端设备的云台进行控制。触摸单击“预置位”可将摄像机调整到已设定的预置位。触摸单击“警示详情”可进入该设备发出的报警详情展示界面见图 15(b),为监测人员提供了更强有力的监视电力输变电现场危险点的工具。



(a)报警视频界面

(b)警示详情展示界面

图 15 手机客户端监控功能显示图

Fig. 15 Mobile client monitoring function display

## 6 现场运行实例分析

该系统已在新疆现场安装完成,整个系统通过测试,运行良好。某条线路现场安装图片见图 16。



图 16 安装现场

Fig. 16 The installation site

该系统能够实现对监测区域的可疑行人,大型机械施工等运动目标的实时监测。一旦检测到所监测的特定区域内有可疑人员爬塔,大型机械在线下监测区域施工,便会联动现场声光报警,提醒行人或大型机械不能停留在警戒区域内,并将现场情况生成报警图片信息逐级上传,同步到 Web 客户端及手机客户端供客户浏览查询。

图 17、18 展示了出现在分析区域的人体目标和大型机械的检测画面及其现场测试分析效果图。



图 17 塔下可疑人员检测

Fig. 17 Pedestrian detection

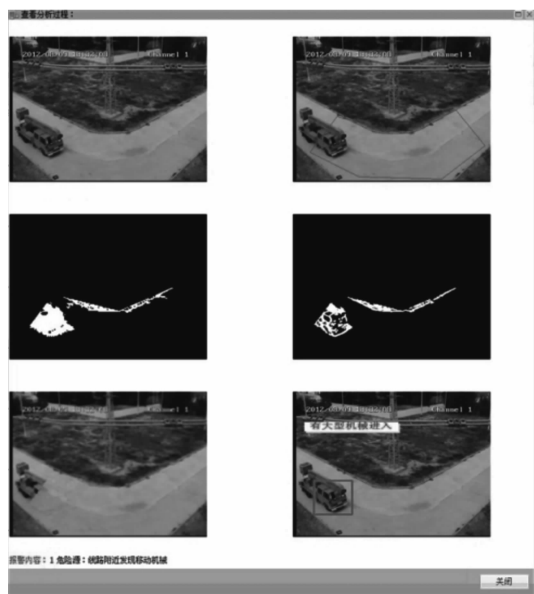


图 18 大型机械动作检测

Fig. 18 Large machinery detection

## 7 结语

笔者介绍的智能视频监测设备安装在输电线路杆塔上,能够实现对线路附近的现场情况进行视频采集、图像处理和智能识别,并将结果通过通信网络发送至后台监测中心(PC)和手机终端,以便运行人员及时掌握现场情况并采取有效措施。该系统不仅可以有效地减少或预防输电线路外力破坏事故的发生,同时大大提高了工作效率,对电网安全稳定运行具有重大意义。

## 参考文献:

[1] 黄新波,程荣贵. 输电线路在线监测与故障诊断[M]. 北

京:中国电力出版社,2008.

[2] 王少华,叶自强. 架空输电线路鸟害故障及其防治技术措施[J]. 高压电器,2011,47(2):61-67.

WANG Shaohua, YE Ziqiang. Analysis of bird damage accidents on overhead transmission lines and prevention techniques[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 61-67.

[3] 龚继志. 输电线路外力破坏故障原因分析与防治对策探讨[J]. 湖南电力, 2012, 32(1): 36-38.

GONG Jizhi. Analysis on the fault cause and explorations on prevention countermeasures of transmission line external force damage[J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(1): 36-38.

[4] 杨国宇, 杨泽清. 架空输电线路智能视频监控研究与分析[J]. 科技创新导报, 2009(28): 1-2.

YANG Guoyu, YANG Zeqing. Research and analysis of intelligent video monitoring technology in overhead transmission lines[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009(28): 1-2.

[5] 刘治红, 骆云志. 智能视频监控技术及其在安防领域的应用[J]. 兵工自动化, 2009, 28(4): 75-78.

LIU Zhihong, LUO Yunzhi. Intelligent video supervising technologies and their applications in security[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(4): 75-78.

[6] 王少华, 叶自强, 梅冰笑. 输变电设备在线监测及带电检测技术在电网中的应用现状[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 84-90.

WANG Shaohua, YE Ziqiang, MEI Bingxiao. Application status of online monitoring and live detection technologies of transmission and distribution equipment in electric network[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 84-90.

[7] 黄新波, 孙钦东, 王小敬, 等. 输电线路危险点远程图像监控系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 192-197.

HUANG Xinbo, SUN Qindong, WANG Xiaojing, et al. Image remote-monitoring system of transmission lines dangerous items[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 192-197.

[8] 葛玉敏, 李宝树, 赵书涛, 等. 基于航拍图像的绝缘子表面状态检测[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 65-68.

GE Yumin, LI Baoshu, ZHAO Shutao, et al. A method based on aerial images to detect the surface state of insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 65-68.

[9] 杨金玲, 柴颖, 狄红卫. 基于DM6446的智能视频监控系统的的设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(3): 113-116.

YANG Jinling, CHAI Ying, DI Hongwei. Design of intelligent video surveillance system based on DM6446[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(3): 113-116.

[10] 曾东, 杜俊杰, 许金明, 等. 风光互补供电系统在输电线路视频监控中的应用[J]. 电气技术, 2012(6): 56-59.

ZENG Dong, DU Junjie, XU Jinming, et al. Application of wind and solar hybrid power supply system in transmission line video monitoring[J]. Electrical Engineering, 2012(6):

- 56-59.
- [11] 华 文, 徐 政. 包含风电场的发电系统可靠性研究[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 36-40.  
HUA Wen, XU Zheng. Reliability assessment of generation systems containing wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 36-40.
- [12] 吴先毅. 基于 DM6446 的智能交通视频系统的研究和实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
- [13] 马会军, 李卫国, 吴增辉, 等. 输电线路智能警示装置及安装机器人的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 22-24.  
MA Huijun, LI Weiguo, WU Zenghui, et al. Intelligent warning device for overhead electric transmission lines and robot for installation[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 22-24.
- [14] 付茂勇, 吕玉祥, 陆 斌, 等. 基于 LPC2378 的远程视频监控系统及图像优化算法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 94-98.  
FU Maoyong, LYU Yuxiang, LU Bin, et al. Visual remote monitoring system and image optimization arithmetic based on LPC2378[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 94-98.
- [15] STAUFFER C. Adaptive background mixture models for real-time tracking[C]//1999 IEEE Computer Society Conference Computer Vision and Pattern Recognition. [S.l.]: IEEE, 1999: 1-7.
- [16] POWER P W, SCHOONEES J A. Understanding background mixture models for foreground segmentation[C]//Proceedings of Image and Vision Computing. New Zealand: [s.n.], 2002: 267-271.
- [17] 李 刚, 邱尚斌, 林 凌, 等. 基于背景差法和帧间差法的运动目标检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 961-964.  
LI Gang, QIU Shangbin, LIN Ling, et al. New moving target detection method based on background differencing and cotermious frames differencing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(8): 961-964.
- [18] 孔 斌. 快速连通域分析算法及其实现[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(1): 110-115.  
KONG Bin. A fast connected component analysis algorithm and its implementation[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2003, 16(1): 110-115.
- [19] 陈仕龙, 束洪春, 万春红, 等. 一种特高压直流输电线路单端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2013, V41(3): 26-31.  
CHEN Shilong, SU Hongchun, WAN Chunhong, et al. The principle of single-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2013, V41(3): 26-31.
- [20] 武 骁, 何正友, 彭少博, 等. 基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, V41(11): 67-73.  
WU Xiao, HE Zhengyou, PENG Shaobo, et al. A UHVDC transmission line pilot protection method based on natural frequencies of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2013, V41(11): 67-73.
- [21] 李小叶, 李永丽, 张 烁. 基于混合智能算法的直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(10): 108-113.  
LI Xiaoye, LI Yongli, ZHANG Shuo. Fault location method based on hybrid intelligent algorithm for HVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(10): 108-113.
- [22] 葛玉敏, 李宝树, 赵书涛, 等. 绝缘子图像中的特征目标提取[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 56-60.  
GE Yumin, LI Baoshu, ZHAO Shutao, et al. Methods to extract target in insulator-image[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 56-60.
- [23] 吴晓光, 王涤琼, 盛 慧. 一种获取图像区域最小外接矩形的算法及实现[J]. 计算机工程, 2004, 30(12): 124-125.  
WU Xiaoguang, WANG Diqiong, SHENG Hui. An algorithm and implementaion for obtaining minimum exterior rectangle of image region[J]. Computer Engineering, 2004, 30(12): 124-125.
- [24] 谢 兵, 许金彤. 基于 3G 网络的输电线路防外力破坏智能视频监控系统研究[J]. 华东电力, 2010, 38(11): 1729-1732.  
XIE Bing, XU Jintong. Investigation on intelligent visual monitoring system of power transmission line accident-preventing based on 3G network[J]. East China Electric Power, 2010, 38(11): 1729-1732.
- [25] 彭 波, 陈俊武, 周志成, 等. 基于无线传输的不良绝缘子检测系统研究[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 310-312.  
PENG Bo, CHEN Junwu, ZHOU Zhicheng, et al. Study on on-line monitoring system based on wireless communication for faulty insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 310-312.
- 张 烨(1988—), 女, 硕士, 助教, 研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究以及图像处理。
- 黄新波(1975—), 男, 博士(后), 教授, 硕导, 研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术研究。
- 陈小雄(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究。
- 周柯宏(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究。
- 张 菲(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究。

(编辑 袁 方)