

文章编号 1004-924X(2008)02-0352-06

# 基于嵌入式计算机的紫外内窥系统

王 平, 罗辞勇, 余 波, 何 为, 张 莉

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对电气设备特殊的内部环境,将紫外放电检测和视频内窥技术相结合,研制了具有紫外放电检测和图像采集功能的紫外内窥检测系统。介绍了紫外脉冲放电信号的检测原理、检测系统硬件平台的构建、嵌入式 Linux 操作系统和 Qtopia 文件系统的启动与运行以及 USB 摄像头的视频图像采集,并给出了该新型电气设备内窥系统的应用程序流程图。实验结果表明:该系统能够准确探测出电气设备内 2 m 以内的局部放电现象,并以图像的方式显示出故障点。通过实验,验证了该紫外内窥系统在电气设备检测方面的实用性。

**关键词:**电气设备;紫外检测;图像采集;内窥系统;嵌入式计算机

**中图分类号:**TN23 **文献标识码:**A

## UV endoscopic system based on embedded computer

WANG Ping, LUO Ci-yong, YU Bo, HE Wei, ZHANG Li

(*State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

**Abstract:** A new electric endoscopic system based on the technologies of embedded system, ultraviolet discharge detection and image acquisition is introduced. The theory of ultraviolet discharge detection, block diagram of hardware platform, process of running embedded Linux and Qtopia file system, and the method of image acquisition by USB camera are discussed, and the flow chart of system application program is given. The experimental results indicate that the UV endoscopic system can detect the internal discharge of electric equipment within 2 m and show the fault point by images. The simulation experiments prove the practicability of the new electric endoscopic system in detecting electric equipment.

**Key words:** electric equipment; ultraviolet detection; image acquisition; endoscopic system; embedded computer

## 1 引 言

电气设备在设计、制造、安装、运行和维护的

过程中可能造成电气设备内部局部电场集中以及导线外绝缘损伤和老化。当电场强度达到一定程度时,就可能形成脉冲电晕放电,严重影响电气设备的正常工作,而这些局部放电现象常发生在电

收稿日期:2007-09-11;修订日期:2007-11-29.

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(No. 0213002433051)

气设备内部,不易被工作人员发现,如果得不到及时处理,通常会引发事故,甚至造成电气设备的损坏。

目前,工作人员进行电气设备放电检测常用的仪器有超声波检测仪和红外热像仪等。超声波检测原理是接收放电时发出的超声波,将其转换为人们可听见的声音,再根据其信号的强弱判断放电的位置和强度。在工厂、电站等强噪声干扰的场合,这种方法很难直观准确地定位远距离的放电点,定量分析也十分困难。红外热像仪可检测放电积累或漏电流引起的温升,但这是一种间接检测放电的方法<sup>[1]</sup>。当用红外热像仪检测到放电发生时,电气设备的放电已经很强,很危险了,而且对于电气设备内部的一些局部放电,红外热像仪也无能为力。

紫外探测技术是继激光探测技术和红外探测技术之后发展起来的又一种新颖探测技术。当电气设备内部发生局部放电时,会辐射出紫外线,应用紫外传感器探测电气设备内部的局部放电,再结合光学内窥技术可灵敏而准确地检测到电气设备内部人眼和常规设备不能直接探测到的局部放电现象,从而帮助现场工作人员迅速准确定位放电点,及时发现电气设备内部的故障并及时地排除险情,做到防患于未然。

## 2 紫外内窥检测原理

当电气设备内部局部放电时会产生等离子体,由于电子迁移率很大,高能电子和  $N_2$ 、 $H_2O$  分子的非弹性碰撞使后者解离、激发和电离。电离过程中,空气中的电子不断获得和释放能量。电子释放能量时会辐射出光波和声波,而辐射出的光谱包括近紫外、可见光、红外 3 个谱段,随着外加电压的增加,局部放电所辐射光谱的紫外区域也随之增强<sup>[2-5]</sup>。

虽然空气中太阳辐射的波长范围很宽,但由于通过地球大气层时大气的吸收与散射,使得它到达地面时不仅强度大大减弱(太阳辐射中短于 400 nm 的紫外辐射仅占太阳总辐射量的 8.7%<sup>[6]</sup>),而且太阳辐射(紫外辐射的主要来源)中波长 220~280 nm 之间的成分几乎被地球的臭氧层完全吸收,这样在低于臭氧层以下就存在一个空域,该空域内太阳背景中紫外辐射的能量

极其有限,波长在 300 nm 以下的“太阳光谱盲区”的紫外辐射已经变得很微弱<sup>[7]</sup>。图 1 为脉冲电晕放电和太阳辐射的光谱分布图。

从图 1 可以看出:脉冲电晕放电和太阳辐射的光谱分布在紫外区域存在明显的不重叠,脉冲电晕放电辐射的光谱相当一部分能量集中在紫外区域。如果电气设备内部产生大量的紫外辐射信号,那么肯定存在局部放电现象,通过紫外传感器就能在其微弱的背景下探测出紫外辐射源,因此用紫外光作为检测信号具有灵敏度高、检测及时准确、抗干扰性强的特点<sup>[8]</sup>。

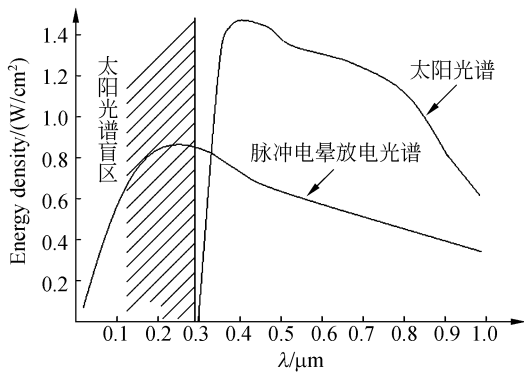


图 1 电晕局部放电和太阳辐射的光谱分布图  
Fig. 1 Spectral distribution of corona discharge and sun radiation

一般而言,电晕放电在可见光波段的能量非常微弱,而在紫外波段则相对较强,但是单独使用紫外探测器无法获得可见光图像进行定位<sup>[9]</sup>。当紫外传感器探测到电气设备内部的局部放电所辐射出的紫外线时,结合光学内窥技术就可以很容易定位电气设备内部的局部放电点,以图像方式直观地显示出故障点的位置,从而及时发现电气设备内部的故障情况。

## 3 紫外内窥系统的设计方案

### 3.1 紫外内窥探头设计

针对电气设备状态监测与检修环境的相关特性研制了电气设备内窥探头,主要用于电气设备内部的放电检测和内窥成像。本文所设计的紫外内窥探头方案如图 2 所示。

工作原理:紫外内窥探头由一个 130 万像素 USB 微型摄像头、紫外传感器(UV 10. T2E.

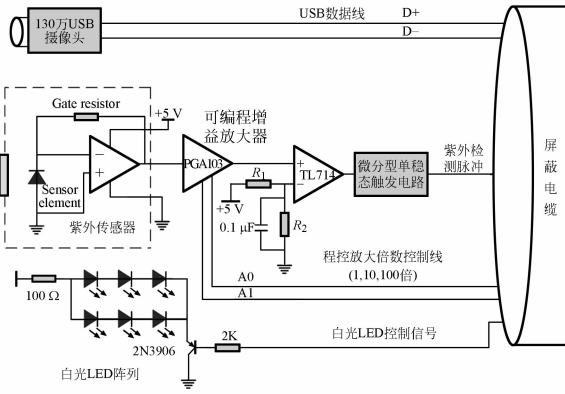


图 2 紫外内窥探头原理框图

Fig. 2 Block diagram of UV endoscopic probe

10L)和 LED 光源组成。当紫外传感器检测到电气设备内部的紫外辐射信号时,输出电压信号,经过可编程增益放大器 PGA103 进行放大,其放大倍数通过软件实现 1,10,100 倍的程控调节。当程控放大器 PGA103 输出电压大于比较器 TL714 的参考电压时,比较器输出高电平信号(通过合理设置比较器 TL714 的参考电压,可以滤除由于背景噪声等干扰信号产生的误输出,从而提高紫外信号检测部分的抗干扰能力)。TL714 输出的高电平脉冲通过微分型单稳态触发电路对脉冲波形进行整形,产生稳定而可靠的低电平脉冲输出。当紫外传感器检测到某方向的紫外辐射信号时,微控制器打开白光 LED 阵列为摄像头图像采集提供光源,配合 130 万像素的微型 USB 摄像头进行电气设备内部实时可视化视频图像的采集,可以很容易发现电气设备内部的故障。本系统研制的电气设备内窥探头实物如图 3 所示。

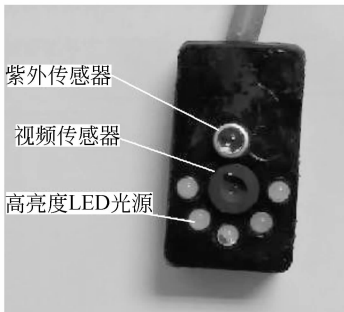


图 3 电气设备内窥探头实物图

Fig. 3 UV endoscopic probe in electric equipment

### 3.2 紫外内窥控制系统设计

为使紫外内窥探测系统具有便携性和低功耗的特点,并能提供实时的可视化图像,本系统采用了基于 ARM9 的嵌入式计算机平台,硬件平台的原理框图如图 4 所示。

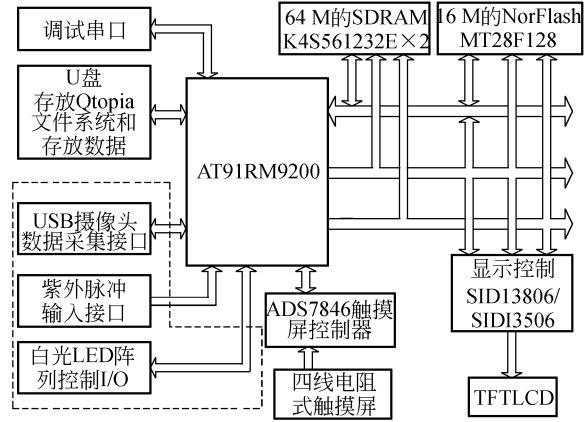


图 4 基于 AT91RM9200 的紫外内窥系统框图

Fig. 4 Block diagram of UV endoscopic system based on AT91RM9200

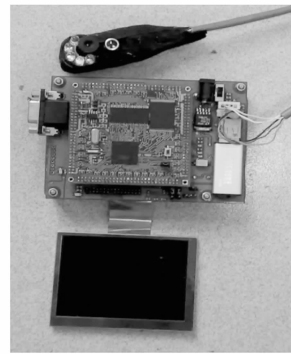


图 5 电气设备内窥系统硬件实物图

Fig. 5 Picture of endoscopic system in electric equipment

工作原理:主控制器选用 ATMEL 公司的 AT91RM9200。当整个系统上电运行时,AT91RM9200 首先运行固化在 16 MBytes 中的 bootloader 程序,完成 64 MBytes 内存的初始化操作,然后将固化在 16 MBytes 中的 Linux 内核搬到 64 MBytes 内存中展开运行,完成嵌入式 Linux 内核的启动工作,TFTLCD 显示控制器 SID13506 的初始化操作,及 Ramdisk 的挂载操作,再运行启动脚本,完成对 U 盘的挂载和 Qtopia 文件系统的启动,然后进入到嵌入式 Qtopia 的用户界面等待操作命令,用户通过触摸屏进行

操作,启动紫外内窥检测的应用程序,通过与紫外内窥探头配合而实现紫外信号检测和视频图像的采集。

本文所完成的紫外内窥系统完整的硬件实物如图5所示。

### 3.2.1 嵌入式操作系统平台的启动与运行

为了实现紫外内窥系统可视化图形界面和应用程序的研发,选择的软件操作系统方案为:Linux+Qtopia。对于嵌入式Linux-2.4.27和Qtopia的详细移植过程此处不做详述。

根据应用系统设计的需要,嵌入式计算机的文件系统由嵌入式Linux文件系统Ramdisk和Qtopia文件系统两部分组成,Ramdisk经过压缩后不到6MBytes,而嵌入式Qtopia文件系统>90MBytes。如果将Qtopia文件系统固化到Flash中,会大大增加硬件成本,而且在使用的过程中,如果被用户损坏,系统将难以恢复。

通过分析可知,嵌入式Linux内核uImage和Linux文件系统ramdisk.gz总共不到7MByte,所以将嵌入式Linux系统的启动代码bootloader、内核uImage和ramdisk.gz固化到16MBytes的Norflash中并写保护,而嵌入式Qtopia文件系统则放在U盘上。如果U盘中的Qtopia文件系统发生损坏,可以将备份在PC上Otopia文件系统重新拷贝到U盘中,从而实现整个系统的快捷恢复,并且U盘的使用也极大地扩展了该系统的存储容量。

为了保证U盘上嵌入式Qtopia文件系统的正常启动,需要修改嵌入式Linux文件系统的初始化脚本文件,在/etc/init.d/rcS脚本文件中添加挂接U盘的命令:

```
mount -t vfat /dev/scsi/host0/bus0/target0/lun0/part1 /mnt
./sleep 5。
```

将U盘上的Qtopia文件系统挂接到Linux文件系统的/mnt目录下,由于CPU对U盘访问速度的限制,所以需要添加sleep延时语句,以确保将U盘上的嵌入式Qtopia文件系统映射到嵌入式Linux文件系统的/mnt目录下。

在/etc/init.d/rcS脚本文件中添加的最后一项是Qtopia的图形引擎:

```
/etc/init.d/qtopia start
```

在Qtopia脚本文件中,为保证Qtopia的图

形引擎启动,需要设置所需的环境变量,导出所需库的路径等操作<sup>[10]</sup>。

### 3.2.2 电气设备内窥系统的图像采集与实现

在嵌入式Linux的系统平台上为了实现USB摄像头的视频采集,必须首先移植USB摄像头的驱动,其主要移植步骤如下:

(1)为Linux-2.4.27-vrs1-ATMEL内核打上补丁,拷贝usb-2.4.31.patch.gz到Linux-2.4.27/drivers/usb下,打上USB驱动补丁;

(2)在Linux内核中配置USB SPCA5XX Sunplus Vimicro Sonix Cameras为module,让Linux内核支持usb-ohci和video for Linux(v4l);

(3)make modules编译USB摄像头的驱动模块,在Linux-2.4.27/drivers/usb/spca5xx目录下,可以得到USB摄像头的驱动:spca5xx.o;

(4)拷贝spca5xx.o到嵌入式Linux文件系统的/usr/lib下,在启动脚本rcS中添加:insmod /usr/lib/spca5xx.o,这样在Linux系统启动的时候就会自动加载USB摄像头驱动,在USB摄像头被驱动程序识别后,就可以通过应用程序实现视频图像的采集。

V4L在Linux系统中提供了设备/dev/video作为视频采集设备对软件的接口。利用USB摄像头进行视频图像采集时,首先需要用open函数打开视频设备,获取文件描述符fd,以后系统调用就可用它来对设备文件进行操作。然后是获取视频设备信息和图像信息,初始化采集窗口,颜色模式,颜色深度和设置帧状态等操作。

对于视频图像的采集,通过mmap()把设备文件映射到内存中,绕过内核缓冲区,所以mmap()方式加速了I/O访问。另外,mmap()系统调用使得进程之间通过映射同一文件实现共享内存,各进程可以像访问普通内存一样对文件进行访问,访问时只需要使用指针而不用调用文件操作函数。因为mmap()的上述优点,所以在程序实现中采用双帧缓冲和内存映射的方法<sup>[11]</sup>,将采集到的视频数据,通过framebuffer直接显示在液晶屏上。

### 3.2.3 电气设备内窥系统应用软件设计

本文设计的紫外内窥系统软件控制程序采用了多线程结构,主线程的主要任务是完成图形界面用户接口的响应,数据采集线程的主要任务是

采集图像数据和紫外放电的检测数据,采集完成后发送消息给主线程进行图形化显示,整个系统的软件流程如图 6 所示。

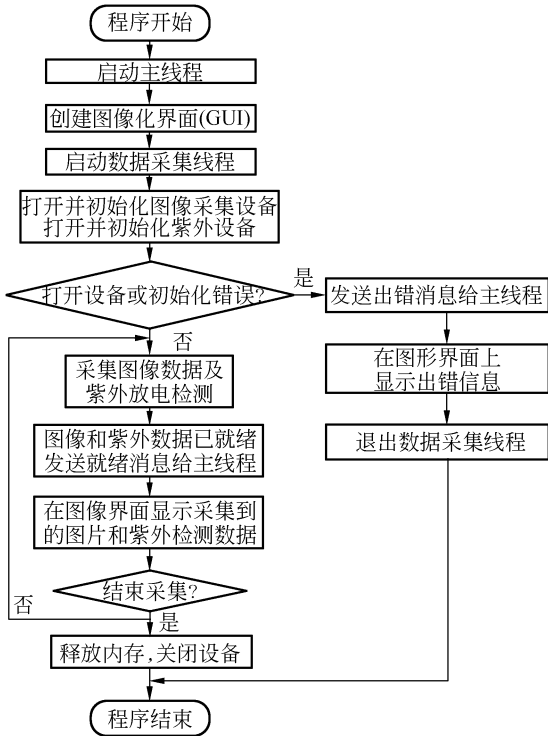


图 6 系统软件流程图

Fig. 6 Flow chart of system software

紫外内窥探头在硬件部分采用比较器设置比较门限电压来抑制背景噪声的干扰。在软件部分采用了窗口定时技术:只有在一个规定的时间段连续接收到一定数量的脉冲才能认为是紫外辐射信号,从而将其与偶然的背景辐射干扰区分开来。

## 4 紫外内窥系统模拟实验

为验证本文研发的紫外内窥系统的实用性和可靠性,本文就电气设备检修探伤做了模拟实验,实验方法如下:

(1) 高压局部放电装置模拟电气设备内部的局部放电;

(2) 小螺丝钉模拟电气设备内部要检修探伤

的零部件;

(3) 封闭箱子的内部模拟检修环境中人眼无法看见或是危险的区域。



图 7 模拟实验软件界面图

Fig. 7 Software simulant experiment

实验表明:由于利用了“太阳光谱盲区”的特点,紫外传感器的工作不受光线的影响,在没有障碍物遮挡的情况下,紫外传感器能够准确检测到 2 m 以内高压放电装置所辐射的紫外光谱。在黑暗中,打开白光 LED 阵列,USB 摄像头能够清晰拍摄到 2 m 以内的视频图像,在  $320 \times 240$  分辨率的情况下,该紫外内窥系统的视频速度能够达到 10 frame/s,USB 摄像头能够清晰拍摄到探伤的小螺钉,在 UV 中正确输出检测到的紫外放电信号,应用软件工作界面如图 7 所示。通过模拟实验,证明了本文设计的基于嵌入式计算机的紫外内窥系统已经基本达到实用要求。

## 5 结 论

基于紫外光谱放电检测和图像采集的紫外内窥系统成功地将紫外光谱的检测技术、图像采集技术和嵌入式计算机平台相结合,是对目前工业内窥技术的完善与补充。通过本系统可以对电气设备内部的绝缘劣化状况、导线外伤探测、设备绝缘缺陷检测等状况有定性的了解,并且为电气设备内部的局部放电检测,损伤预测,故障排查与检修提供了重要的参考依据,对于预防潜伏性和突发性的事故起着重要的作用。

## 参考文献:

- [1] 李青文,陈涛,汪金刚,等. 紫外脉冲法在特高压放电检测中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 26-29.

- LI Q W, CHEN T, WANG J G, *et al.*. Application of UV pulse method on the UHV discharge detection [J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(12):26-29. (in Chinese)
- [2] 赵文华,张旭东,姜建国,等. 尖板电晕放电光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(5): 955-957.  
ZHAO W H, ZHANG X D, JIANG J G, *et al.*. Spectrum analysis of tip-plane corona discharges[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(5):955-957. (in Chinese)
- [3] 王文春,刘东平,吴燕. 空气中电晕放电高能电子密度沿反应器分布的光谱研究[J]. 分子科学学报, 1999,15(3): 125-128.  
WANG W CH, LIU D P, WU Y. A study of density distributions of high energy electrons produced from corona discharge in the air along the radial of reactor by advanced emission spectral method [J]. *Journal of Molecular Science*, 1999, 15(3):125- 128. (in Chinese)
- [4] 王文春,刘峰,张家良,等. 利用发射光谱研究脉冲电晕放电中的自由基[J]. 光谱学与光谱分析, 2004,24(11): 1289- 1292.  
WANG W CH, LIU F, ZHANG J L, *et al.*. Study of radicals in pulsed corona discharge by emission spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(11):1289-1292. (in Chinese)
- [5] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006,14(4):709-713.  
YAN F, YU Z J, YU X, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 709-713. (in Chinese)
- [6] 方伟,王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响[J]. 光学精密工程, 2006,14(5):775-780.  
FANG W, WANG Y P. Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 775-780. (in Chinese)
- [7] 柳燕. 大气臭氧层、紫外辐射与人类健康[J]. 地球物理学进展, 1998,13 (3):103-110.  
LIU Y. Atmospheric ozone layer, solar UV radiation and the health of mankine [J]. *Progress in Geophysics*, 1998, 13(3):103-110. (in Chinese)
- [8] 黄晓玲. 紫外型火焰检测器的研制[J]. 仪器仪表学报, 1999,20(5):523-525.  
HUANG X L. A study on ultra-violet flame detector [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, 20(5): 523-525. (in Chinese)
- [9] 于晓,王欣,闫丰,等. 电晕探测系统中 JPEG 截图文件系统的设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):721-726.  
YU X, WANG X, YAN F, *et al.*. Design of JPEG image file system in corona detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):721-726. (in Chinese)
- [10] <http://www.trolltech.com/products/qtopia>.
- [11] 王滔,于洁. Linux 系统下 USB 摄像头驱动开发[J]. 电子技术应用, 2004,11:8-10.  
WANG T, YU J. The development of USB camera driver in Linux [J]. *Application of Electronic Technique*, 2004, 11:8-10. (in Chinese)

**作者简介:**王平(1976—),男,博士,讲师,主要从事电力系统放电检测,嵌入式计算机系统及智能化仪器仪表等方面的研究工作。Email: cq\_u\_dq@163.com

**导师简介:**何为(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为嵌入式计算机系统,智能化仪器仪表等在电力系统中的应用。E-mail:hewei@cqu.edu.cn