

文章编号: 1003-501X(2007)07-0093-05

## 电晕探测中的紫外对焦控制系统

袁红艳<sup>1,2</sup>, 闫丰<sup>1</sup>, 陈俊江<sup>1</sup>, 张涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 本文简要介绍了电晕探测的原理, 采用可见光与紫外双光谱探测方法来检测电晕信号的存在并对其进行定位。文中介绍了电晕探测系统紫外对焦控制模块, 并阐述了对焦的双闭环控制过程及其软硬件实现方法。分析了对焦控制过程中误差产生的原因, 主要包括传动机构的空回及系统的过冲量。通过实验测量得到传动机构的空回和过冲量, 将其加入紫外对焦过程的总对焦量。采用上述方法可以减小紫外对焦系统的对焦误差, 使紫外相机像面始终处于焦深之内。最后, 利用电晕探测系统对高压电厂中的电晕信号进行检测并定位。

**关键词:** 电晕探测; 紫外对焦控制; 误差分析; 信号分析

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Focus control system for ultraviolet in corona detection

YUAN Hong-yan<sup>1,2</sup>, YAN Feng<sup>1</sup>, CHEN Jun-jiang<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The method for detecting ultraviolet corona in real time was presented in the paper. By combining UV spectrum image with visible spectrum images, the system could detect the existence of ultraviolet corona and confirm the position. Furthermore, the reasons that the error was produced in the process of adjusting focus of UV CCD were analyzed in detail, including the backlash of rotation gear and system overshoot. The system performance was improved by taking account of those reasons and compensating them. Fieldwork result proves that the corona can be detected and positioned accurately by this system.

**Key words:** corona detection; ultraviolet focusing control; error analysis; signal analysis

## 引言

电晕是电力系统中重要的电能损耗原因之一。一条110kV电力线路和一个110kV变电所组成的电力系统有50个地方会产生电晕现象, 那么这个电力系统所损耗的功率就有55~11kW。据不完全统计, 全国每年因电晕损耗的电能达到了20.5亿kWh<sup>[1]</sup>。为此需要对电晕信号进行检测和定位, 采取措施减少电晕损耗。电晕检测是利用紫外波段来探测电晕放电火花的。电晕放电会放射出波长范围在230~405nm范围内的紫外光线, 而大部分的人类肉眼只能探测到可见光, 不能检测到电晕信号<sup>[2-10]</sup>。为了实现对电晕信号的检测与定位, 电晕探测系统采用了紫外-可见光双光谱探测技术<sup>[11-13]</sup>。本文介绍了双光谱电晕探测系统中紫外对焦模块的控制原理, 控制模型的建立及此模型的误差分析与处理。

本文的紫外对焦控制系统是根据高斯成像公式 $1/l + 1/l' = 1/f$ , 采用间接调整紫外CCD焦面位置的方法对紫外电晕信号进行成像, 即固定CCD焦面的位置, 改变补偿镜使光学成像系统的像距与紫外CCD的焦面位置重合。由于电晕信号检测的目标的变换范围在3m~∞之间, 紫外系统的焦距为168mm。根据高斯公

收稿日期: 2006-07-06; 收到修改稿日期: 2007-05-20

作者简介: 袁红艳(1979-), 女(汉族), 江苏睢宁人, 博士研究生, 主要研究工作是自动控制与图像处理。E-mail: yuanhongyan@hotmail.com

式可以计算出像距的变化范围 168~178mm 之间。

## 1 光学系统

电晕探测系统光学结构如图 1。入射光束经保护镜射入光学系统, 由于入射光包含可见和紫外成份, 选用半反射镜将入射光束分成两路, 一路进入成像镜头 A, 再经过窄带滤光片, 得到 240~300nm 波长的光束经紫外增强器增强的紫外光再进入 CCD A 成像; 另一路经反射进入成像镜头 B, 成可见的背景图像。最后将两路图像叠加就可在一幅图像上既看到背景又看到电晕信号。由于进入镜头 A 与 B 的光束是一致的, 它们所包含的信息特征都相同, 可以实现对电晕信号的检测和定位。

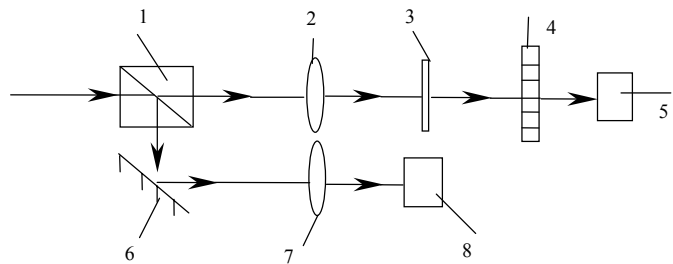


图 1 光学系统结构

1. 分光棱镜; 2. 镜头 A; 3. 滤光片; 4. 紫外增强器;

5. CCD A (紫外相机); 6. 全反射镜; 7. 镜头 B; 8. CCD B (可见光相机)

Fig.1 Structure of optical system

1.Split prism; 2.Lens A; 3.Filter; 4.UV intensifier;

5. CCD A (UV camera); 6. Holophote; 7.Lens B; 8. CCD B (visible light camera)

## 2 紫外对焦控制

对焦系统主要由对焦单元和检焦单元组成<sup>[14]</sup>。紫外对焦控制中对焦单元主要由补偿镜、对焦电机组件、对焦控制器和限位部件组成; 检焦单元集成在可见光成像模块中, 通过异步串行总线将检测的对焦量发送给对焦控制器。对焦电机组件主要由对焦电机、减速箱及齿轮副组成, 内嵌增量式编码器输出 TTL 脉冲信号, 对焦电机轴与减速箱相连, 再通过齿轮副、丝杆将电机的转动转变为补偿镜的直线运动, 从而改变紫外成像系统的像距, 补偿镜的最大导程为 4.53mm。对焦控制器选用 51 系列的单片机。为了提高对焦组件的安全可靠性, 保证补偿镜正常工作, 补偿镜最大行程范围内装有两组电限位机构。

### 2.1 原理灵敏度计算

对焦过程中电机的步程是以增量式编码器反馈的脉冲累加量为基准, 故对焦机构的灵敏度也可解释为当编码器输出一个脉冲时, 像面沿光轴方向的移动量, 记为  $\sigma$ :

$$\sigma = 1 \times 10^{-2} / i_0 i_1 m \quad (1)$$

式中:  $i_0$  表示减速箱的减速比, 为 1:66;  $i_1$  表示齿轮副的传动比, 为 1:10;  $m$  表示直流电机轴每转一圈增量式编码器输出的脉冲数, 本编码器的数值为 16。将上述数值代入式(1)中计算得  $\sigma$  为  $0.947 \mu\text{m}$ 。

系统的半倍焦深由式(2)<sup>[15]</sup>计算得:

$$\delta = 2F^2 \lambda \quad (2)$$

式中:  $\delta$  表示相机半倍焦深;  $F$  表示光学系统相对孔径的倒数;  $\lambda$  表示工作波长。

本系统  $F$  为 3, 由于系统焦深正比与工作波长, 焦深越小, 要求对焦控制系统的精度越高, 故选取工作波长为 230nm 为焦深计算依据, 根据公式(2)计算得  $\delta$  为  $4.14 \mu\text{m}$ 。

由以上分析可知, 本对焦机构的灵敏度  $0.947 \mu\text{m}$  远小于相机的半倍焦深  $4.14 \mu\text{m}$ , 能够满足成像要求。

### 2.2 对焦控制的实现

电机运行过程一般分为三个阶段, 即加速阶段(升频)、匀速运行阶段和减速阶段(降频)<sup>[16]</sup>。当电机和负载条件确定后, 最高运行频率一般是固定的, 此时, 要缩短运行时间, 只有尽可能地缩短加速段和减速段的运行时间, 即快速启动和制动。为提高系统抗干扰能力, 减小振荡, 系统采用双闭环控制模型, 图 2 所示。

位置反馈值为  $S_{\text{back}} = N \times \sigma$ , 其中  $N$  为编码器反馈脉冲数。

对于直流电机而言, 加在电机两端的电压与其转速之间成线性关系, 因此紫外对焦控制系统通过调整直流电机的电压来改变补偿镜的执行速度。直流电机电压控制模型如下:

$$V = \begin{cases} A \frac{(S_{\text{des}} - S_{\text{back}})^2}{\sigma^2 V_m} & \text{if } \frac{S_{\text{des}} - S_{\text{back}}}{\sigma} \leq 88 \\ V_{\text{max}} & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $V$ 为直流机电压； $A$ 为常数； $S_{\text{des}}$ 为补偿镜需要走行的距离； $S_{\text{back}}$ 为位置反馈值； $V_{\text{max}}$ 为直流电机的额定电压为12V。

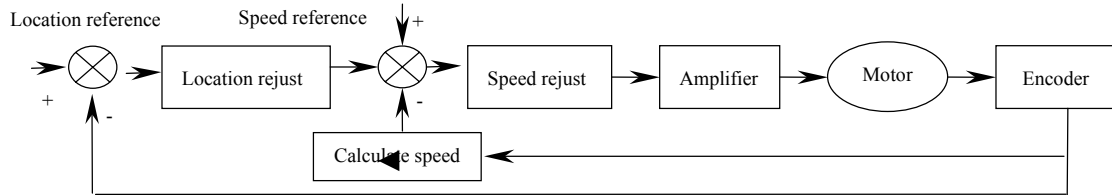


图 2 双闭环控制模型

Fig.2 Model of double feedback control system

硬件电路主要以89C52单片机及其外围硬件设备为核心，完成解析对焦指令、输出PWM脉宽调制信号并控制电机的正常运行。单片机的外围电路包括限位开关及限位信号的整形、编码器脉冲信号的采集、直流电机的功率放大芯片等，图3即为紫外对焦控制原理图。单片机与检焦单元之间通过串口通讯进行数据传输；利用I/O 口及内带的两个

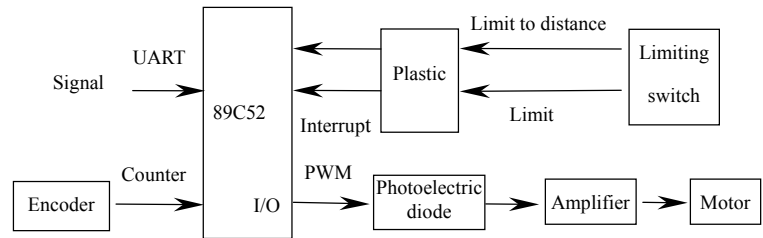


图 3 基于嵌入式系统的紫外对焦控制原理图

Fig.3 Focusing control for UV camera based on embedding system

16为定时器输出PWM脉冲调宽调制信号，功率放大芯片选用专用的电机控制芯片LMD18245，它可以很容易地完成直流电机的数字控制；编码器的反馈信号作为计数器的输入端用来累计补偿镜的运行距离；远景限位与近景限位分别与单片机的两个外部中断口相连。

利用上述的控制方法，当目标从3m变化为无穷远时，补偿镜能够在3s内走完全程，即4.53mm，满足了系统实时性的要求。

### 3 对焦控制的误差分析与处理

误差的大小是精密仪器重要的技术指标之一<sup>[17]</sup>。影响本系统对焦精度的主要因素为传动机构的空回及对焦系统的惯冲量。

为了确定空回，设计试验来测量。试验中对焦机构固定在支撑架上，使补偿镜筒保持水平。通过对焦电机控制补偿镜筒进行正反方向交替移动，用电感测微仪测量补偿镜的移动量，在齿轮不同位置进行重复测量，获得空回量，并取其平均，为 $3\mu\text{m}$ 。此误差多次累积也会使紫外相机的像面偏离焦深之外，所以需要对它进行修正。

电机调整方向用二进制进行表示即0(趋向无穷远)和1(趋向3m)，记第 $n$ 次对焦的方向为 $i$ ，第 $n+1$ 次调整方向为 $j$ ，则电机的控制模型由式(3)变为

$$V = \begin{cases} A \frac{(S_{\text{des}} + (-1)^{j-i}(s - \varphi) - S_{\text{back}})^2}{\sigma^2 V_m} & \text{if } \frac{S_{\text{des}} + (-1)^{j-i}(s - \varphi) - S_{\text{back}}}{\sigma} \leq 88 \\ V_{\text{max}} & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

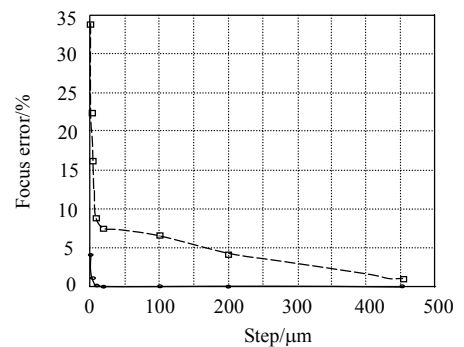


图 4 误差曲线图

Fig.4 Focus error curve

式(4)中 $s$ 为空回量,  $\varphi$ 为惯冲量。

经过上述方法修正后, 系统的误差变化如图4所示, 图中虚线表示未加入误差修正相机的对焦误差, 实线表示加入误差修正后测得的对焦误差。从图4中可知加入误差精度较优化前最少提高了0.9%, 最大提高了29.4%, 紫外相机能够在焦深内成像, 成像清晰。因此, 本文中提出的误差修正方法对提高紫外图像的清晰度和影像分辨率起到了关键性作用。

## 结束语

本文介绍了电晕探测原理、电晕探测系统紫外对焦的原理、对焦控制模型及软硬件实现。并在电晕检测模型的基础上, 分析了紫外相机对焦中的误差来源, 并提出了提高紫外相机对焦精度的解决方案。现场实验表明采用不同的工作步长, 系统



图 5(a) 电晕信号检测图

Fig.5(a) Corona discharge picture



图 5(b) 高压线端子上的电晕信号

Fig.5(b) Corona discharge in the terminal of high voltage cable

对焦精度较优化前有很大的提高, 保证了 CCD 在系统的焦深范围内成像, 能够精确的进行电晕的探测和定位。图 5 所示为该紫外电晕探测系统外拍实况图, 图 5(a)是探测系统大目标搜索目标, 图 5(b)为图 5(a)图中某个高压端子的电晕放电图。图中白色斑点即为检测到的电晕信号, 从图中可以看出此仪器能够非常准确地判断电晕信号的存在及其位置, 满足了电力系统的需求。

## 参考文献:

- [1] 刘晓东. 电晕, 真的不能消失吗[J]. 中国电业, 2002(9): 64-64.  
LIU Xiao-dong. Can't corona disappear really?[J]. **China Electric Power**, 2002(9): 64-64.
- [2] 傅晨钊, 周建国, 肖 嵘, 等. 紫外电晕检测仪检测线路绝缘子的模拟试验[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 50-53.  
FU Chen-zhao, ZHOU Jian-guo, XIAO Rong, et al. Simulation Experiments of UV Corona Detectors for Monitoring of Line Insulators[J]. **East China Electric Power**, 2005, 33(6): 50-53.
- [3] 张钦芝. 新型日间电晕探测照相机[J]. 国际电力, 2001, 5(2): 60-62.  
ZHANG Qin-zhi. New Type of Corona Camera during Daytime[J]. **International Electric Power for China**, 2001, 5(2): 60-62.
- [4] 蒋 燦. 紫外电晕检测仪在电晕放电检测中的应用[J]. 华东电力, 2004, 32(8): 34-35.  
JIANG Ye. Application of Ultraviolet Corona Detector in Corona Discharge Detection[J]. **East China Electric Power**, 2004, 32(8): 34-35.
- [5] 李朝木. 导弹光学告警系统及对抗技术综述[J]. 现代防御技术, 2002, 30(4): 35-40.  
LI Zhao-mu. A Summary of Missile's Optical Warning System and Countermeasure Technology[J]. **Modern Defence Technology**, 2002, 30(4): 35-40.
- [6] 李朝木. 探测导弹羽烟紫外辐射的光电高速采集系统[J]. 现代防御技术, 2001, 29(1): 50-55.  
LI Zhao-mu. Electronic-Optical Data High-Speed Acquisition System of Ultraviolet Radiation Missile Plume Detecting[J]. **Modern Defence Technology**, 2001, 29(1): 50-55.
- [7] Harada T, Hatano T. Thin Film Filters for an EUV Multilayer Mirror Optics with a Laser Produced Plasma Light Source[J]. **Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena**, 2005, 44: 1075-1077.

- [8] Yoshikawa I, Yamazaki A, Murachi T, et al. Development of an Extreme Ultraviolet Imaging Spectrometer for the BepiColombo Mission[J]. **Advances in Space Research**, 2004, **33**(12): 2195-2199.
- [9] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, **27**(20): 97-98.  
DAI Li-bo. Using UV Imaging Technology to Detect Discharge of High Voltage Cable[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, **27**(20): 97-98.
- [10] 迟殿林, 曾庆立. 用紫外成像检测电气设备外绝缘状况[J]. 东北电力技术, 2005(1): 22-28.  
CHI Dian-lin, ZENG Qing-li. Detecting Outer Insulating Status for Electric Appliances by Way of UV Imaging[J]. **Northeast Electric Power Technology**, 2005(1): 22-28.
- [11] 李洪. 双光谱图像检测的图像配准融合技术[D]. 广州: 暨南大学硕士学位论文, 2004.  
LI Hong. Image Registration and Fusion Technology in the Detection of Double Spectrum Image Detection[D]. Guangzhou: Master's Thesis of JINAN University, 2004.
- [12] 勒贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003, **32**(3): 294-297.  
LE Gui-ping, PANG Qi-chang. The Key Points of UV Imaging and Detecting System[J]. **Acta Photonica Sinica**, 2003, **32**(2): 294-297.
- [13] 于晓, 王欣, 闫丰, 等. 紫外电晕探测系统中双 DSP 通信协议设计[J]. 长春理工大学学报, 2005, **28**(3): 77-80.  
YU Xiao, WANG Xin, YAN Feng, et al. Design of dual-DSP Communication Protocol for Ultraviolet Corona Detection System[J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**, 2005, **28**(3): 77-80.
- [14] 王国辉. 空间相机胶片传输控制系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.  
WANG Guo-hui. A study on film transmission control system in space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [15] Fischer R E, Biljana Tadic-Galeb. **Optical System Design**[M]. USA: McGraw-Hill Companies Inc, 1976.
- [16] 张洪文. 空间相机对焦技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 15-45.  
ZHANG Hong-wen. Research on The Auto-focusing Technology for Space Camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, 2003: 15-45.
- [17] 费业泰. 误差分析与误差处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.  
FEI Ye-tai. **Error Analysis and Processing** [M]. Beijing: China Machine Press, 1995.

~~~~~  
(上接第 53 页)

#### 参考文献:

- [1] Chavez Jr. P S, Sides S C. Comparison of three different methods to merge Multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic [J]. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 1991, **57**(3): 295-303.
- [2] Tu T M, Su S C, Shyu H C, et al. A new look at IHS-like image fusion methods [J]. **Information Fusion**, 2001, **2**: 177-186.
- [3] 李士心, 刘鲁源, 杨 晔, 等. 基于平稳小波变换的陀螺仪信号去噪方法[J]. 天津大学学报, 2003, **36**(2): 165-168.  
LI Shi-xin, LIU Lu-yuan, YANG Ye, et al. Gyro Signal Denoising Using Stationary Wavelet Transform [J]. **Journal of Tianjin University**, 2003, **36**(2): 165-168.
- [4] Liu J G. Smoothing filter-based intensity modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details [J]. **Remote Sensing**, 2000, **21**(18): 3461-3472.
- [5] 王海晖, 彭嘉雄, 吴 巍, 等. 多源遥感图像融合效果评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, **39**(25): 33-37.  
WANG Hai-hui, PENG Jia-xiong, WU Wei, et al. A Study of Evaluation Methods on Performance of the Multi-Source Remote Sensing Image Fusion [J]. **Computer Engineering and Applications**, 2003, **39**(25): 33-37.