

# 图像处理技术在直升机巡检输电线路中的应用综述

仝卫国, 苑津莎, 李宝树

(华北电力大学, 河北省 保定市 071003)

## Application of Image Processing in Patrol Inspection of Overhead Transmission Line by Helicopter

TONG Weiguo, YUAN Jinsha, LI Baoshu

(North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** Due to its features such as high efficiency, accuracy and safety, patrol inspection by helicopter evolves as an important inspection manner for high voltage overhead transmission lines. Through the processing and analysis on lots of aerial photographs acquired by patrol inspection with helicopter, the faults and defects of transmission lines can be found, so there is a good application prospect of image processing technology in patrol inspection of overhead transmission lines. Present research situation of applying image processing to patrol inspection of overhead transmission lines by helicopters home and abroad is analyzed, and main technical problems to be solved in the field of applying image processing technology to this field are put forward, and possible solutions are discussed. Finally, the development trend in this field is prospected.

**KEY WORDS:** image processing technology; patrol inspection of overhead transmission line by helicopter; image extraction and recognition; fault diagnosis

**摘要:** 直升机巡检以其高效、准确和安全等特点逐渐成为高压输电线路巡检的重要方式。通过对直升机巡检采集到的大量航拍图像的处理和分析可以发现输电线路故障和缺陷,因此图像处理技术在电力线路巡检中具有良好的应用前景。分析了国内外直升机巡检输电线路图像处理技术的研究现状,提出了图像处理技术应用于该领域需要解决的几个主要技术问题,并探讨了可能的解决方案,最后对输电线路巡检的发展方向进行了预测,并提出该领域将可能成为研究热点。

**关键词:** 图像处理技术; 直升机巡检输电线路; 图像提取与识别; 故障诊断

## 0 引言

直升机巡检输电线路具有高效、快捷、可靠、成本低、不受地域影响等优点,已成为我国输电线路巡检的重要方式<sup>[1-2]</sup>。“直升机巡视为主,人工巡视为辅”是我国高压、超高压线路巡检的发展方向。

从20世纪50年代开始,欧美一些发达国家就开始了由直升机对架空线路进行例行巡检、维护、带电作业等方面的研究。我国从20世纪80年代开始进行直升机巡检和带电作业等方面的研究,目前,华中电网公司、华北电网公司、南方电网公司等相继开展了直升机电力作业的尝试,并取得了一些宝贵经验<sup>[3]</sup>。直升机巡检以目测为主,并与仪器观察和仪器自动检测相结合,可以完成杆塔、导地线及其金具、绝缘子等部件的运行状态的巡检。巡检内容包括:1)通道变化情况,包括污源分布变化情况,线路附近房屋及其他设施变化情况,塔基附近地形变化情况,保坎、护坡、排水沟是否完好等;2)标示牌、警示牌是否完好,铁塔塔材是否丢失、锈蚀,塔上是否有异物等;3)防震锤是否脱落或滑移,间隔棒是否倾斜或滑移,地线放电间隙变化情况;4)绝缘子是否破裂,绝缘子串是否倾斜,金具零件是否锈蚀和变形。此外,还可以进行接点过热、异常电晕、导地线内部损伤、接触电阻、绝缘距离等的测量和绝缘子质量判断。

日常直升机巡检中,主要工作方式是目测,也可借助望远镜观察线路,或者事后观看摄影、摄像记录的图像来判断线路故障及隐患。显然以上方法效率低,检测结果受主客观因素影响大,检测精度难以保证。

直升机巡检过程中,摄影、摄像设备记录了大量输电线路图像信息,包括数字图像信息、序列图像信息和红外图像信息等。这些图像包含了输电线路的基本特征及运行状态信息,通过对这些图像的处理可得到输电线路的基本状况,发现设备缺陷和故障隐患。如果能够实现对巡检图像的自动处理,不仅可克服人工方式的各种缺陷,提高工作效率和

检测精度,而且能够提高线路巡检的自动化水平,减少巡检人员,提高直升机巡检的安全性和质量。

图像处理技术和GPS技术在电力巡检领域中的应用<sup>[4]</sup>使直升机自动巡检成为可能,同时也为无人机在电力巡检中的应用奠定了基础。实现以上功能的关键是巡检图像处理,包括图像预处理、图像检测和模式识别等。目前,国内外关于电力巡检图像处理技术的研究还处于起步阶段,直升机巡检图像自动处理及故障自动诊断将成为直升机巡检研究的又一重要课题。本文将分析直升机巡检图像处理技术的研究现状和存在问题,以期为该领域图像处理技术研究提供参考。

## 1 国内外研究现状

直升机巡检采集的图像存在不同程度的退化现象,即在成像过程中出现了畸变、模糊、失真或噪声混入,造成了图像质量的下降。造成图像退化的原因很多,主要包括:1)光学系统的像差、衍射、带宽有限等造成的图像失真;2)太阳辐射、云层遮挡、大气湍流的扰动效应等造成的遥感图像失真;3)成像器件的拍摄姿态、光电转换器件的非线性等引起的图像几何失真;4)成像系统与拍摄景物的相对运动造成的图像运动模糊;5)图像在成像、数字化、采集和处理过程中引入了噪声等。其中,运动模糊和各种噪声的影响尤为严重。

四季更替使输电走廊的自然环境和地貌不断变化,采集图像的背景会随环境的变化变得非常复杂,对比度降低,且干扰增多,同时其他自然地貌与人工建筑也使图像背景的复杂程度进一步加深。复杂自然背景下目标图像的提取与识别是输电线故障自动诊断的另一个主要技术瓶颈。

输电线路巡检需要监测的设备种类多,故障类型也多,所以自动诊断过程需根据不同的设备和故障类型采用不同的检测方法,如数字图形学方法、神经网络技术和模糊逻辑算法等。

国内外在直升机巡检图像处理技术方面的研究已取得一定成果:

1)图像采集方面成果。直升机巡检过程中,目标物体的相对运动以及摄像设备的“振动”会引起图像的退化现象<sup>[5-6]</sup>。对于静态图像可以容忍的视场运动需在视场范围的1%~2%,一般应保证在1%以内;同时图像采集过程中视角的变化应小于 $10^{-4}$ rad。为了补偿直升机运动造成的图像退化,文

献[7]采用角点检测方法来配准图像固定点,从而实现相机调焦过程中能够调整检测范围以实现目标跟踪,并设计了摄像机自动控制系统以实现巡检图像的自动采集。

2)目标提取与识别方面成果。巡检图像处理中,目标图像提取是关键。背景复杂性及其变化的多样性使目标图像和背景之间的差异很小,因此目标图像提取与背景去除是巡检图像处理中的瓶颈问题。在输电线提取与识别方面,国内外已有一些初步研究成果。文献[8]用Ratio算子提取电力线像素点,然后采用分段Radon变换提取并连接各分段电力线,再利用类卡尔曼滤波技术跟踪连接电力线的断裂部分,从而完成输电线的提取;文献[9]采用差分几何方法提取图像边缘,采用Hough变换和数字图形学方法提取输电线;文献[10]指出有学者采用雷达反射波极化统计方法提取和识别输电线;文献[11]采用神经网络法滤除背景噪声后提取输电线;文献[12]基于最大熵阈值方法进行图像分割,应用连通区域方法对绝缘子串进行提取和识别。以上方法初步解决了输电线设备的提取和识别问题,但还有待进一步完善。

3)输电线路故障诊断方面成果。文献[13]介绍了应用高精度图像分辨技术测量弧垂的装置,其将“聪明相机”固定安装在杆塔上,对准固定悬挂在导线上的标靶,通过装置内部的图像处理软件获取摄取图像中标靶的空间坐标,计算出导线的弧垂数据;文献[14]介绍了日本采用直升机巡检输电电缆的方法,通过图像处理软件检测电缆的亮度和形状,判断电缆的受损伤情况;文献[15]介绍了基于机器视觉原理的输电线弧垂测量方法,通过机器视觉方法确定输电线路特征点(隔离棒)的空间坐标,进而应用曲线拟合方法实现弧垂的实时测量。

华中电网公司研发了“机载多角度电力巡线系统”<sup>[16]</sup>,该系统利用多角度图像数据和线路高度数据提取特定目标信息,对目标进行三维重建,可方便获取高压线路走廊周围物体与电力线的距离,进行距离测量和危险点定位,该项目的软硬件系统已开发完毕,并完成实验样机且进行了飞行实验。

## 2 直升机巡检图像处理技术存在的问题

### 2.1 图像处理技术

巡检图像处理流程如图1所示。CCD(charge coupled device)包括:可见光数码相机、数码摄像机

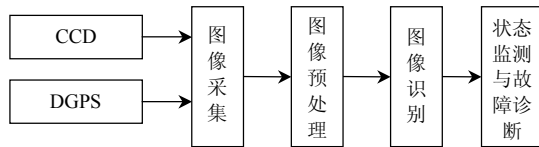


图1 图像处理流程

Fig. 1 Flow chart of image process

以及红外照相机; 差分全球定位系统(difference global positioning system, DGPS)设备安装在直升机内部, 提供直升机的方位信息, 并应用差分动态定位技术进行定位, 平面定位误差可达 2cm, 高程误差为 5cm。由于我国电力公司用于巡检的直升机多为临时租用, 因此人工摄像和固定摄像为常用的图像采集方式。

目前, 图像处理技术在电力巡检中的应用历史还很短, 国内外研究成果还不多, 国外研究成果主要集中在图像采集的稳定性和图像质量的改善上, 主要应用于摄像机的智能控制方面, 输电线路故障的识别与定位方面却很少涉及。直升机激光三维空间扫描技术可应用于输电走廊的三维信息采集, 但成本高不适用于日常电力巡检。国内外在输电线路提取与识别、弧垂测量、电缆状态监测等方面已有初步研究成果, 但其精度和实用性方面还有待进一步提高, 而杆塔、绝缘子等重要输电设备图像监测方法的相关研究才刚刚起步。图像处理技术在电力巡检领域具有良好的应用前景, 但还存在一些关键技术需要解决。

## 2.2 图像采集

目前, 直升机巡检的图像采集主要是有限目标(即输电线路及杆塔等)的图像采集, 目标物始终在有效视场内。但直升机是运动的, 只有在发现故障或缺陷时才悬停飞行, 因此直升机巡检中的图像采集主要是动态图像的采集。摄像机采集动态图像主要有 2 种方式: 1) 摄像机转动跟踪目标, 主要有手工摄像和智能系统跟踪摄像 2 种途径, 人工手持摄像机采集图像有一定危险, 且要求摄像人员有一定的拍摄技巧, 该方法在直升机巡检工作初期采用。智能系统跟踪摄像需要智能控制系统调节摄像机的焦距和视角以跟踪目标, 同时需配备相应的支持软件, 该套系统技术难度较大且软硬件成本较高, 需要前期有一定投入。2) 摄像机相对直升机固定, 目标随直升机的运动而运动, 通过连续抓拍的序列图像来分析目标状态。该方法采集的图像序列中, 不仅目标个数变化, 目标姿态也在变化, 图像处理难度较大, 但硬件成本最低。

建立准确的摄像机成像几何模型是进行图像检测的前提。成像几何模型只与三维物体点的空间位置、相机焦距、物体或相机相对位置参数有关, 与二维图像的强度信息无关。成像几何模型的参数与摄像机参数有关, 摄像机参数分为内部参数和外部参数。内部参数描述相机的光学和几何特性, 如图像中心、焦距、镜头畸变等; 外部参数用于描述世界坐标系与相机坐标系之间的三维位置关系。这些参数需通过相机的标定与计算得到。

现有摄像机标定方法分为: 传统摄像机标定方法和摄像机自标定方法。传统摄像机标定方法是利用标准参照物与图像的对应约束关系来确定摄像机参数; 自标定方法不需要知道准确的模型三维度量信息, 利用图像间的约束关系来计算模型的参数, 可在线、实时校准摄像机参数, 但有时所得解不唯一, 且不稳定。1999 年张正友博士提出一种介于传统标定法和自标定法之间的基于二维平面模板的摄像机标定方法<sup>[17]</sup>, 该方法既避免了传统标定方法设备要求高、操作繁琐等缺点, 又较自标定方法精度高、鲁棒性更好, 因而得到广泛应用。在此基础上, 又有学者提出了该方法的改进方法, 该方法可使摄像机的标定变得灵活而准确。

## 2.3 图像预处理

目前已有较成熟的巡检图像预处理方法, 但由于直升机巡检是在野外自然环境下进行, 图像采集易受噪声和运动影响, 对噪声和运动模糊的处理是巡检图像预处理中必须重点考虑的问题。

除光学系统、电子器件引起的加性噪声外, 直升机巡检图像中的主要噪声是由光照条件和大气湍流等引起的乘性噪声。同态滤波可用于消除乘性噪声, 也可应用小波法和独立分量分析法进行图像去噪<sup>[18-19]</sup>。估计图像噪声标准差后, 应采取相应措施提高图像峰值信噪比, 以达到较好的去噪效果。

采集图像时直升机一般是运动的, 由运动引起的图像模糊对航拍图像的影响非常严重。为去除由运动引起的模糊需要确定运动的速度及方向, 由于速度和方向很难估计准确, 常规的去模糊方法如维纳滤波法或有约束的最小平方滤波法很难达到去模糊要求, 但目前已有自修正运动速度和运动方向的去模糊算法, 应用效果良好。

## 2.4 图像识别

目前图像识别技术已应用于变电站实时监测中<sup>[20-21]</sup>, 电力线路巡检中图像识别必须能提取和识

别各种输电设备,但输电设备目标物的提取与识别较前者更加困难。输电线路背景(包括山林、河流、农田、道路、雨雪等)复杂,且随着四季的更迭背景外观会随时改变,因此目标提取非常困难,必须提出适用性强的图像处理算法来解决该问题。由于拍摄角度和视距的变化,同一目标的航拍图像会呈现不同的形状或形式,这给目标识别带来了困难,需根据目标特征采用神经网络技术、证据理论、模糊算法等信息融合方法进行目标识别。

输电线路自动识别需解决问题有:1)图像处理通用算法;2)自动识别过程中种子点的自动选取;3)电力线与背景中相近图形的判别,如道路、田垌和沟坎等。应用图像地理信息检测领域的道路自动识别技术<sup>[22-23]</sup>有助于输电线的提取与识别,但现有研究成果还不能完全实现输电线的自动提取和识别(如各种自适应阈值算法的通用性差),仍有许多技术难题有待解决。

绝缘子自动识别是输电设备识别的另一个复杂问题<sup>[24]</sup>,该方面现有研究成果还很少。同样由于航拍角度和视距的不同,图像中绝缘子会呈现不同的形状,绝缘子识别时除需要考虑形状特征外,还需考虑纹理特征、颜色特征、小波分析特征等。因此在改进图像预处理算法的基础上,需运用信息融合技术才能达到绝缘子识别目的。目前,基于人工神经网络的绝缘子识别方法较为可行,可根据形状特征、纹理特征、颜色特征、小波系数特征等建立识别样本集,通过模型训练建立绝缘子识别系统。

在绝缘子检测中,可通过红外图像检测绝缘子局部过热。红外图像的去噪、特征提取与选择<sup>[25]</sup>、可见光图像的配准等方面仍有许多理论和实际问题有待解决,目前还没有绝缘子识别的有效方法。

### 2.5 状态监测与故障诊断

状态检测与故障诊断是电力巡检的核心问题,其以目标的提取与识别为基础,通过模式识别方法得到输电线路的工作状态并进行故障诊断。

输电线受损坏情况以及弧垂检测是输电线状态检测的主要工作。近年来由于用电负荷增长,许多已有输电线路为提高输送能力将导线最高运行允许温度从70℃提高到80℃,此时线路弧垂成为制约因素,需要对弧垂进行校验或实时监测,以确保线路运行和被跨越设备的安全。通过巡检过程中采集的序列图像,利用多目视觉原理<sup>[26]</sup>可实现弧垂的实时测量,同时该方法也可建立输电线路的三维

立体模型,该方面研究本课题组正在进行。

绝缘子常见故障包括污秽、裂纹、爆裂、绝缘子串倾斜等,通过可见光图像的处理可以发现该类故障,但有时也需通过红外图像才能发现绝缘子故障。

绝缘子故障诊断很大程度上依赖绝缘子图像识别,目前可利用知识判别系统、专家系统或模糊理论对常见故障进行识别。绝缘子故障诊断也可通过可见光图像和红外光图像进行综合判断。

通过电力线巡检图像也可发现其它故障,包括铁塔、金具、导地线等的缺陷,铁塔上警示牌的完好情况,铁塔倾斜情况,塔上蜂窝等异物分布情况,铁塔基础护坡、保坎、排水沟等附属设施完好情况,塔基及附近区域表土跨塌、水上流失、植被破坏、冲沟发育等地表变化情况,线路通道内房屋、道路、污源及被跨越物的分布和变化情况。

此外,可通过GPS/POS(global positioning system/position orientation system)获取图像采集时的GPS数据和POS数据,进而实现故障定位,该技术相对成熟,可以配合图像处理技术实现巡检结果的自动处理。为了实现输电线路各种故障类型的自动处理,还需要建立各种输电线路故障的图像数据库,这将需要大量的图像采集处理工作。

## 3 结论

输电线路故障是造成电网大面积停电事故的重要原因之一,为保证电力系统安全可靠运行,日常的电力线巡检工作具有重要意义。直升机巡检已成为我国输电线路巡检的重要方式,输电线路的自动巡检以及无人机输电线巡检已成为输电线路巡检的发展方向。因此图像处理技术必然会越来越多地应用到巡检工作中,巡检图像的自动处理技术在直升机巡线工作中也必然会发挥越来越重要的作用。

图像处理技术在直升机巡检中的应用涉及现代数字图像技术、模式识别、人工智能技术、统计方法等前沿技术,国内外在该领域的研究仅处于起步阶段且差距很小,相信将来该领域会成为极富挑战性和实用价值的研究热点。

## 参考文献

- [1] 张柯,李海峰,王伟.浅谈直升机作业在我国特高压电网中的应用[J].高电压技术,2006,32(6):45-55.  
Zhang Ke, Li Haifeng, Wang Wei. Analysis of helicopter patrol application prospect in China's UHV grid[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 45-55(in Chinese).

- [2] 于德明, 沈建, 汪骏, 等. 直升机在电网运行维护中的研究与应用[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 107-112.  
Yu Deming, Shen Jian, Wang Jun, et al. Research and application of helicopter in patrol and hotline operating maintenance of power lines [J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 107-112(in Chinese).
- [3] 李国兴. 我国直升机电力作业的现状与发展[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 41-45.  
Li Guoxing. Present situation and development of helicopter power job in China[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 41-45(in Chinese).
- [4] Ma Lili, Chen Yangquan. Aerial surveillance system for overhead power line inspection[R]. Center for Self-organizing and Intelligent Systems (CSOIS), USA, Utah, 2003.
- [5] Jones D I. Aerial inspection of overhead power lines using video: estimation of image blurring due to vehicle and camera motion[C]//IEE Proceedings of Vision, Image, and Signal Processing. UK: IEE Proceedings of Vision, Image, and Signal Processing, 2000: 157-166.
- [6] Jones D I, Earp G K. Camera sightline pointing requirements for aerial inspection of overhead power lines[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(2): 73-82.
- [7] Ian Golightly, Dewi Jones. Corner detection and matching for visual tracking during power line inspection[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(9): 827-840.
- [8] 李朝阳, 阎广建, 肖志强, 等. 高分辨率航空影像中高压电力线的自动提取[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 1041-1046.  
Li Chaoyang, Yan Guangjian, Xiao Zhiqiang, et al. Automatic extraction of power lines from aerial image[J]. Journal of Image and Graphic, 2007, 12(6): 1041-1046(in Chinese).
- [9] Tong Weiguang, Li Baoshu, Yuan Jinsha, et al. Transmission line extraction and recognition from natural complex background[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Baoding, China: IEEE Systems, Man and Cybernetics Society, 2009: 2473-2477.
- [10] Kamal Sarabandi, Moonsoo Park. Extraction of power line maps from millimeter-wave polarimetric SAR images[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(12): 1802-1809.
- [11] Li Zhengrong, Liu Yue, Ross Hayward, et al. Knowledge-based power line detection for UAV surveillance and inspection systems[C]// IEEE Conference on Image and Vision Computing. New Zealand: IEEE, 2008: 1-6.
- [12] 黄宵宁, 张真良. 直升机巡检航拍图像中绝缘子图像的提取算法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 194-197.  
Huang Xiaoning, Zhang Zhenliang. A method to extract insulator image from aerial image of helicopter patrol[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 194-197(in Chinese).
- [13] 徐青松, 季洪献, 王孟龙. 输电线路弧垂的实时监测[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 206-209.
- [14] Ishino R, Tsutsumi Dr F. CRIEPI's aerial inspection of transmission conductor[J]. Transmission & Distribution World, 2004(12): 52-55.
- [15] Li Junfang, Li Baoshu, Zhao Shutao. A measuring method for transmission line sag based on computer vision[C]//Sustainable Power Generation and Supply Conference Provisional Proceedings. Nanjing, China: UK-China Network of Clean Energy Research, 2009: 1-5.
- [16] 张昊明, 杨又华, 阎广建, 等. 机载多角度多光谱成像技术在电力系统中的应用[J]. 华中电力, 2006, 19(6): 1-3.  
Zhang Wuming, Yang Youhua, Yan Guangjian, et al. Application of airborne multiangular and multispectral imaging system in power system[J]. Central China Electric Power, 2006, 19(6): 1-3(in Chinese).
- [17] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on PAMI, 2000, 22(11): 374-376.
- [18] Zhao Zhenbing, Yuan Jinsha, et al. Wavelet image de-noising method based on noise standard deviation estimation[C]//Proceedings of 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Beijing, China: IEEE Systems, Man and Cybernetics Society, 2007: 1910-1914.
- [19] 高强, 赵振兵, 李然, 等. 基于独立分量分析的近红外图像去噪方法的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 94-98.  
Gao Qiang, Zhao Zhenbing, Li Ran, et al. Reaseach and its application of a method of near-infrared image de-noising based on ICA[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 94-98(in Chinese).
- [20] 杨森, 董吉文, 鲁守银. 变电站设备巡检机器人视觉导航方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 12-16.  
Yang Sen, Dong Jiwen, Lu Shouyin. Visual navigation method of substation patrol robot[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 12-16(in Chinese).
- [21] 孙凤杰, 崔维新, 张晋保, 等. 远程数字视频监控与图像识别技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 81-84.  
Sun Fengjie, Cui Weixin, Zhang Jinbao, et al. Application of remote digital video supervisory and image recognition technology for power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 81-84(in Chinese).
- [22] Chen Dezhi, Qin Qiming, Du Shihong, et al. Extracting road from high-resolution satellite images with the combination of automatic and semi-automatic methods[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, Korea: IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2005: 3880-3883.
- [23] 黄睿, 杨少军, 何明一. 航空遥感图象中道路的自动提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(34): 218-221.  
Huang Rui, Yang Shaojun, He Mingyi. Automatic road extraction from aerial remote sensing images[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(34): 218-221(in Chinese).
- [24] 葛玉敏. 基于计算机视觉的绝缘子状态检测[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
- [25] 李佐胜, 姚建刚, 杨迎建, 等. 基于方差分析的绝缘子红外热像特征选择方法[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 92-96.  
Li Zuosheng, Yao Jiangan, Yang Yingjian, et al. Feature selection method of insulator infrared thermal image based on variance analysis[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 92-96(in Chinese).
- [26] 章毓晋. 图像工程(下册): 图像理解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 103-147.



全卫国

收稿日期: 2010-04-21.

作者简介:

全卫国(1967), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电工理论与新技术、图像处理技术及传感器, E-mail: twg1018@163.com.

(编辑 徐梅)