

## 输电线路山火监测预警系统的研究及应用

陆佳政, 吴传平, 杨莉, 张红先, 刘毓, 徐勋建

(国网湖南省电力公司电力科学研究院, 国家电网公司输变电设备防冰减灾技术重点实验室, 湖南长沙 410007)

**摘要:** 研发了输电线路山火监测预警系统并成功应用于多省市跨区电网线路。介绍了火点监测基本原理, 给出了基于卫星遥感的输电线路山火监测与预警系统硬件和软件架构及其组成功能。为提高火点判断准确度, 提出一种火点判断阈值自适应算法; 提出了火点与杆塔距离优化算法, 减少杆塔距离计算量。研制的输电线路山火监测与预警系统成功应用于多省市跨区电网。应用结果表明, 研制的输电线路大范围山火监测系统能准确有效地监测输电线路山火并及时发布预警信息, 有利于提高电网抵御山火灾害能力。

**关键词:** 输电线路; 山火监测; 山火预警; 火点判断; 卫星遥感

### Research and application of forest fire monitor and early-warning system for transmission line

LU Jia-zheng, WU Chuan-ping, YANG Li, ZHANG Hong-xian, LIU Yu, XU Xun-jian

(Department of Power Scientific Research of Hunan Province Power Company of State Grid, Power Transmission and Distribution Equipment Anti-Ice & Reducing-Disaster Technology Key Laboratory of State Grid Corporation, Changsha 410007, China)

**Abstract:** The research and application of forest fire monitor and early-warning system for transmission line are discussed. The fundamental principle of fire monitor is introduced, and the structure and components of hardware and software of the monitor system are given. A self-adaption algorithm for fire judgment threshold is proposed to enhance the fire identification accuracy. And an optimization calculation method for the distance between fire and tower is presented to decrease the calculation amount. The developed forest fire monitor and early-warning system for transmission line is applied to the trans regional power transmission lines. Application results indicate the developed system can monitor the fire with high accuracy and publish the early-warning message, which is useful for the enhancement of resist ability of forest fire disaster for transmission lines.

**Key words:** transmission line; forest fire monitor; forest fire early-warning; fire judgment; satellite remote

中图分类号: TM726

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)16-0089-07

## 0 引言

近年来, 受工农业生产和人们生活习俗影响, 输电线路因山火跳闸事故频发, 严重影响电网的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。2011年, 南方某省110 kV及以上的输电线路因山火跳闸次数达43条次; 2012年清明期间, 华中地区山火频发导致多起500 kV交流线路故障停运事故; 2013年3月上旬, 多省份发生了较大范围山火, 导致多条跨区线路发生异常。山火已成为威胁输电线路安全运行最严重的自然灾害之一。因此, 迫切需要对输电线路山火采取有效的监测, 提前发布山火预警, 提高山火灾害防控能力<sup>[3-4]</sup>。

已有的输电线路监测系统主要针对输电线路覆冰、污秽、设备故障等<sup>[5-9]</sup>, 不能监测到输电线路附

近山火。在输电线路山火对线路造成跳闸的机理研究方面, 国内部分学者进行了深入研究<sup>[10-12]</sup>。而在输电线路山火监测预警方面, 少有文献涉及。进行输电线路山火监测, 及时发现输电线路山火动态, 可以及时处置和防范山火扩大而对线路造成严重影响, 具有重要的实际意义。在森林火灾监测方面, 林业和气象部门比较关注, 气象部门开展了天气雷达进行火灾监测的研究和应用<sup>[13]</sup>; 林业部门采用卫星遥感数据来监测林火并成功应用<sup>[14-16]</sup>。卫星数据来源主要有中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 系列、改进的甚高分辨率辐射仪 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 系列, FY (风云) 系列等。部分学者对MODIS、AVHRR系列卫星遥感监测林火的火点识别原理和方法进行了研究<sup>[17-23]</sup>。然而, 输电线路山火与林火存在区别, 森林火点一般

基金项目: 国家电网公司科技攻关重大项目 (KG10K16003)

为大规模的林火，而小规模杂草火或小灌木火就能引起输电线路跳闸；此外，林火监测没有结合输电线路。林业部门火灾监测不能满足电力系统的需求。传统的输电线路山火监测依靠人工巡视，劳动强度大，且视野有限、监测不及时，效率低。

为了实现大范围的输电线路山火集中监测，研制了基于卫星遥感的输电线路山火监测系统。介绍了火点监测的基本原理，设计基于卫星遥感的输电线路山火监测系统硬件和软件架构，开发了输电线路山火监测预警系统。为提高火点判识准确度，提出一种火点判断阈值自适应算法；并提出一种基于数据库引擎和网格索引的火点最近杆塔距离优化算法，避免火点与杆塔距离的海量计算。成功应用于电网进行山火监测预警，应用效果良好。

## 1 火点监测原理

### 1.1 火点判识原理

根据适用于绝对黑体的普朗克公式，可推导亮度温度计算公式<sup>[18]</sup>：

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \log^{-1} \left( \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \omega_\lambda} + 1 \right) \quad (1)$$

式中： $c$ 为真空中的光速； $k$ 是玻尔兹曼常数， $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； $h$ 为普朗克常数， $h=6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{S}$ ； $\omega_\lambda$ 为辐射出射度。

辐射出射度 $\omega_\lambda$ 计算公式为

$$\omega_\lambda = (D_N - \text{offset}) \times \text{scales} \quad (2)$$

其中： $D_N$ 为影像的灰度值； $\text{offset}$ 和 $\text{scales}$ 分别为波段的偏移值和增益值。将 $\omega_\lambda$ 代入式(1)，即可计算出山火监测相关通道的亮度温度值。

### 1.2 卫星介绍

本文开发的输电线路山火监测系统基于具有山火监测功能的极轨卫星实现，为AVHRR和MODIS两种极轨气象卫星。

#### (1) 基于 AVHRR 的极轨气象卫星

本系统采用 AVHRR 极轨气象卫星数据来源于美国的 NOAA 系列。AVHRR 为五个探测通道的扫描辐射计，目前运行的有 NOAA16、17 和 18。卫星各通道、波段和相应功能如表 1 所示。AVHRR 辐射计星下点的分辨率为 1.1 km，探测温度的动态范围为 190~330 K。在地表常温下，AVHRR 图像中相邻像素的辐射率，通道 CH3、CH4 和 CH5 相差都不大。但当地面出现火点等高温目标时，即使这个火点的面积远远小于像素分辨率，由于高温目标在 CH3 的辐射值大大高于周围背景像素的辐射值，因而在 CH3 上包含火点的像素与周围像素产生明

显反差，而对于 CH4 和 CH5，相邻像素的反差很小，这样易于区别出火点。

表 1 AVHRR 部分光谱通道特性

Table 1 Characteristics of part spectral channels of AVHRR

通道序号	光谱波段/ $\mu\text{m}$	主要探测目的（针对环境监测）
CH1	0.58~0.68	CH1 和 CH2 配合计算植被指数
CH2	0.725~1.10	
CH3	3.55~3.93	监测高温点，如林火、城市热岛
CH4	10.3~11.3	CH4 和 CH5 组成红外分裂窗，用于反演海面温度时进行大气削弱订正。
CH5	11.5~12.5	

#### (2) 基于 MODIS 的极轨气象卫星

本系统接受的基于 MODIS 极轨卫星主要有美国的 TERRA 和 AQUA 系列卫星，均搭载了 MODIS 传感器。MODIS 传感器有 36 个通道，光谱范围宽，从 0.4~14.4 $\mu\text{m}$  全光谱覆盖；同时多通道观测大大增强了对地球复杂系统的观测能力和对地表类型的认识能力。MODIS 传感器用来识别火点的通道 CH21、CH22 和 CH23 的空间分辨率为 1 km。扫描宽度达到 2 330 km。每日可全覆盖、多频次观测。对多种突发性、快速变化的自然灾害有很强的实时监测能力。

因上述卫星过境时间不同，可相互验证不同卫星数据对同一火点进行监测的准确性，并可持续跟踪火情。

## 2 输电线路山火监测系统

### 2.1 系统硬件结构原理

输电线路山火监测系统原理结构如图 1 所示。输电线路山火监测系统硬件由卫星接收装置、前端接收服务器、后端应用服务器和山火预警服务器组成。卫星通过红外遥感传感器获取地面温度数据，然后发送给地面卫星接收装置。卫星接收装置将数据传输给数据处理服务器，进行图片预处理，再将图片传输给后端火点判识与预警服务器，进行火点的判识与线路告警计算。最后将监测与预警信息发布给输电线路运行维护单位，进行山火应急处置。

前端接收服务器主要进行快视、投影和传输。快视即将获取的卫星数据显示为包含经纬度信息的原始卫星云图。投影是将获得的卫星图片投影到监测目标地理范围。后端应用服务器是山火监测的核心，主要进行图像处理、与其他资料融合叠加和山

火判识等, 可同时处理多颗卫星数据。图像处理环节将图片进行过滤(去除斑点、滤波、锐化等)、几何变换(快速傅立叶变换、离散余弦变换、沃尔什变换等)、点运算(线性变换、阈值变换、灰度均衡等)、颜色处理(颜色调整、灰度化、反色)等一系列处理, 消除各种干扰因素, 以便于火点判识。经处理后的图片可以叠加地理信息, 经火点判识处理后, 得到火点的经纬度坐标及其地理信息。山火预警服务器将接收的火点信息导入包含地理和线路杆塔信息的预警系统, 计算火点与线路距离, 给出告警结果, 并将告警进行发布。山火预警信息具有信息存储、历史查询、统计分析等功能。

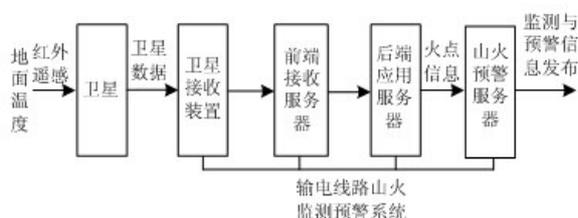


图 1 山火监测预警系统原理结构图

Fig. 1 Structure of fire monitor and early-warning system

## 2.2 系统软件流程

系统软件处理流程如图 2 所示。首先根据卫星运行轨道预测卫星过境的时间, 然后进行卫星资料的实时接收和显示, 并将卫星图片进行投影到目标监视区域, 接着进行消噪、图像增强等预处理, 提高图片的质量, 使之满足山火识别系统的要求。然后进行火点判识。经过火点识别之后, 可获得实时的山火火点信息, 包括火点的经纬度、实时火点图等, 其中火点的经、纬度信息存储到数据库中。再将火点信息与输电线路结合, 计算火点与线路杆塔距离, 最后通过短信信息平台将山火监测信息实时群发给现场线路运维人员。

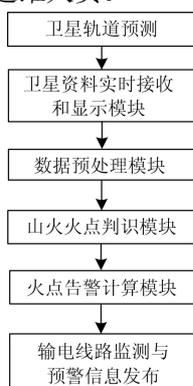


图 2 系统软件整体流程图

Fig. 2 Software flow chart of the system

## 3 火点识别算法

### 3.1 火点判识模型

根据山火燃烧时亮温异常高, 辐射能力大的特点, 同时燃烧象元同周围象元的亮温差值较大, 提出了火点的判断模型:

$$\begin{cases} T_c > T_h \\ T_c - T_r > \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $T_c$ 、 $T_r$  分别表示根据亮温计算公式得到的亮温主通道和亮温参考通道值;  $\Delta T$  即二者的亮温差, 对火点判识进行限定, 剔除部分误差点和耀斑点。此处根据对监测到的山火火点统计发现, 所有的火点处亮温差值全部都大于等于 8K, 取  $\Delta T$  为 8K。 $T_h$  为火点判断阈值, 其选取将直接影响到火点判识的准确度。若  $T_h$  设置过高, 则判识结果将剔除某些温度较低的小火点, 若  $T_h$  设置过低, 则可能将某些温度较高的非火点误判为火点。

### 3.2 基于地面气温的火点判断阈值 $T_h$ 自适应算法

传统的火点判识方法采用固定的火点判断阈值对各地区的火点进行统一判识。应用经验表明, 此方法未考虑各地区差异、季节性差异等, 容易造成火点误判或漏判。为解决此问题, 提出一种基于地面气温的火点判断阈值动态计算方法, 根据不同地区的地面实时气温和不同月份等对火点判识判断阈值进行动态计算, 从而进行火点判识。

所提算法考虑不同季节和地表温度对于地面物体的发射率特征对亮温造成的影响, 结合地面的环境温度、季节特性, 建立动态判断阈值函数, 用动态判断阈值函数代替固定阈值进行火点判识, 提出火点判断阈值  $T_h$  的自适应算法, 从而提高火点监测的准确性。自适应算法的步骤如下:

① 选择经过火点验证的地区(以地级市为单位)历史火点判断阈值。

② 计算历史火点判断阈值与当时地面平均温度、最高温度、最低温度的相关性, 选择重要的影响因子。

③ 建立监测月份、相关性强的重要影响因子与历史判断阈值之间的数学函数。

④ 按照最小二乘法的原则, 采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization algorithm, PSO)对判断阈值的函数进行参数优化, 确定判断阈值的数学模型。

最小二乘法的优化目标函数为使计算阈值  $T_{hi}$  和历史验证阈值  $T_{ho}$  之间的平方差最小, 即

$$\min F = \sum_{i=1}^n |T_{hi} - T_{ho}|^2 \quad (4)$$

PSO 算法中用粒子对应寻优问题的可行解, 每个粒子都有一个自己的位置  $X_i$  和速度  $V_i$ , 用于决定优化的方向和距离, 还有一个由被优化的函数决定的适应值  $P_i$ , 用来衡量粒子的优劣。

$P_g$  表示群体所找到的最优解, 即全局最优解, 更新公式如式 (5)。

$$\begin{cases} V_i(t+1) = \bar{\omega} \times V_i(t) + r_1 \times (P_i - X_i(t)) + r_2 \times (P_g - X_i(t)) \\ X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t$  为进化代数;  $\bar{\omega}$  为惯性因子;  $r_1$  和  $r_2$  是学习因子, 为分布于  $[0, 1]$  之间的随机数。

⑤ 根据建立的判断阈值计算模型, 结合监测时间、监测地面实况温度计算出获取的监测卫星数据对应的火点判断阈值, 实现动态判断阈值的计算。

#### 4 线路杆塔与火点距离优化算法

输电线路杆塔数量众多, 多达数十万基, 在出现大范围山火, 火点数多达数百个时, 如进行遍历搜索, 则计算火点与输电线路距离费时非常长, 且严重影响到服务器的工作效率。本文提出一种基于数据库引擎和网格索引的火点最近杆塔距离优化算法, 如图 3 所示。通过在数据库引擎端将地图区域网格化, 优先搜索火点所在网格内的最近杆塔, 如未找到则扩展至临近网格, 直至找到离火点最近的杆塔, 实现快速计算火点与输电线路距离, 当距离小于门槛值时, 及时发布输电线路山火告警信息, 指导线路运维人员尽快赶赴现场处置输电线路山火。

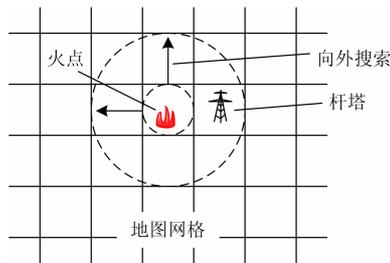


图 3 火点与杆塔距离计算方法示意图

Fig. 3 Sketch map of the calculation method of distance between fire and tower

方法如下:

- ① 在数据库引擎端, 建立起线路杆塔分布区域, 整个区域被划分为大小相等的若干块网格。
- ② 导入火点信息表时, 在火点信息表上建立一

条结构化查询语言 (Structured Query Language, SQL) 查询的触发器, 该触发器查询各个火点所属的杆塔区域网格, 若火点所属的网格四周无杆塔分布, 则以该网格为中心向四周逐层扩大单元格, 直到在扩展区域内寻找到周围杆塔。

③ 采用球面距离计算公式

$$d(x_1, y_1, x_2, y_2) = R \times \arccos(\sin(x_1) \times \sin(x_2) + \cos(x_1) \times \cos(x_2) \times \cos(y_1 - y_2)) \quad (6)$$

式中,  $R$  为地球半径。计算杆塔与火点的实际距离, 返回满足最大告警距离范围内与火点距离最近的杆塔及距离。

④ 依据火点与最近杆塔的距离满足的告警级别, 并形成告警信息并发布。线路告警一、二、三级距离范围设定为

$$\begin{cases} d \leq 1000 \text{ m,} & \text{一级告警} \\ 1000 \text{ m} < d \leq 2000 \text{ m,} & \text{二级告警} \\ 2000 \text{ m} < d \leq 3000 \text{ m,} & \text{三级告警} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $d$  为火点与杆塔距离。

#### 5 系统应用

系统成功应用于国家电网湖南、湖北、四川、安徽等 11 省市跨区输电线路的山火监测与预警工作。2013 年初清明节期间, 4 月 1 日至 4 月 17 日, 共监测到 869 个火点, 其中跨区电网输电线路山火一级告警 29 个, 27 个得到验证确有山火。如 4 月 2 日上午 11 时, 系统监测到安徽铜陵地区朱桂 2882 线 24# 东南侧 422 m 处有一级告警火点, 火点亮温值为 329, 高于火点判断阈值 320, 如图 4 (a)、(b) 所示。经安徽电力公司线路运维人员现场验证, 朱桂 2882 线 24# 东南侧约 500 m 处确有山火发生, 线路转冷备用状态。4 月 2 日 15 时, 系统监测到湖北省电力公司磁永线 181# 杆塔西侧 952 m 处发生一级告警山火, 火点亮温值为 330, 高于火点判断阈值 321, 如图 4 (c)、(d) 所示。经现场人员核实, 磁永线 181# 杆塔西侧约 1 000 m 处确实发生山火; 4 月 13 日 9 时, 系统监测到成梦 II 回湖北段 34# 杆塔西南侧 965 m 处发生山火一级告警, 火点亮温值为 328, 高于火点判断阈值 322, 如图 4 (e)、(f) 所示。经现场人员核实现场确有山火, 火场面积较大。现场应用结果表明系统能有效监测到较大地理区域范围的山火, 及时对输电线路进行山火预警。

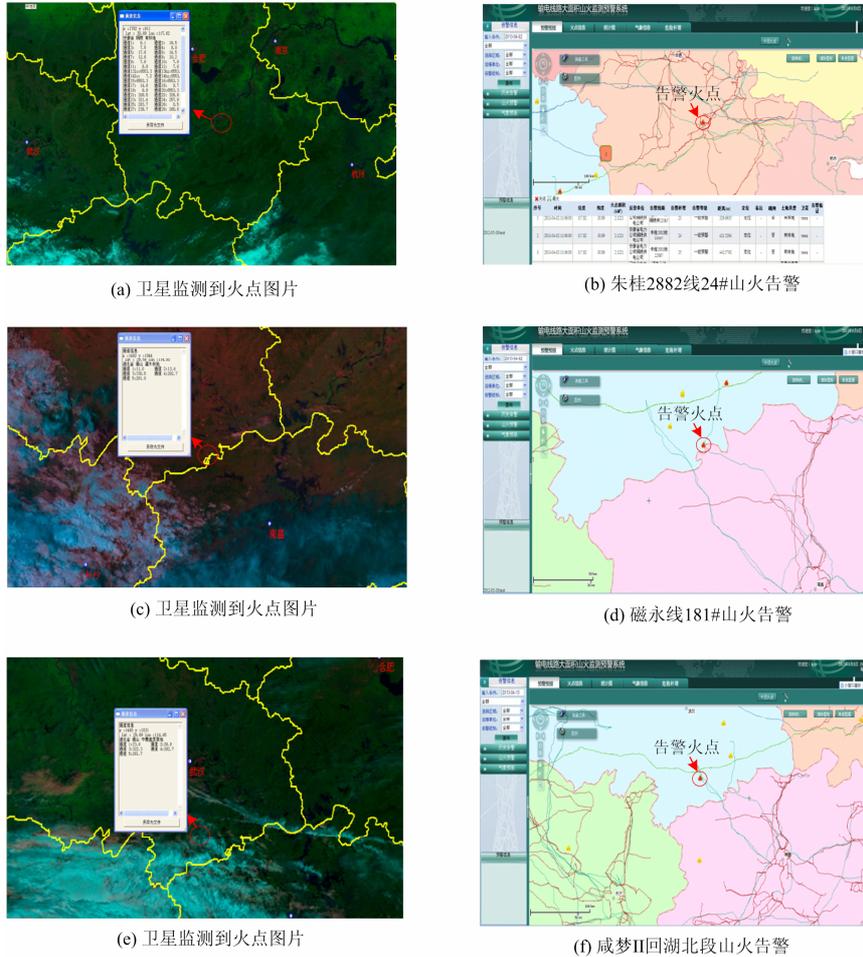


图 4 山火监测预警系统应用

Fig. 4 Applications of fire monitor and early-warning system

表 2 跨区电网线路山火告警部分杆塔列表

Table 2 List table of fire alarming transmission line tower of trans regional power grid

日期	火点数	一级告警/个	告警杆塔	验证情况
2013-4-2	36	2	朱桂 2882 线 24#杆	经验证, 现场约 200 m <sup>2</sup> 山火
			磁永线 181#杆	经验证, 发生了山火, 并蔓延至磁永线 185 号杆塔
2013-4-12	73	2	磁永线湖北段 163#杆	验证有山火, 对线路无影响
			磁永线江西段 194#杆	验证有山火, 开始为二级告警, 随后火势蔓延至离线路 100 m 处得到控制, 对线路无影响
2013-4-13	92	2 个	咸梦 II 回湖北段	经验证, 火场面积很大, 最终火势得到控制, 对线路无影响
			长南 I 线山西段	经验证, 连续监测到线路西侧有约两平方公里火场
2013-4-14	62	3	江西公司德香线 28#杆	已经验证, 为当地政府开发烧荒, 可控制, 对线路无影响
			长南 I 线山西段 143#杆	验证为山火, 线路附近已派人看守, 火势控制住, 未影响线路
			湖南苏蓉 II 线 73#杆	验证为山火, 为村民烧荒, 对线路无影响

## 6 结论

(1) 设计了基于卫星遥感的输电线路山火监测系统硬件和软件架构, 并开发了输电线路山火监测系统。

(2) 提出了火点判断阈值自适应算法, 实现火点阈值动态计算, 提高火点判别的准确度; 提出基于数据库引擎和网格索引的火点最近杆塔距离优化算法, 减少了火点与杆塔距离计算量, 缩短了预警计算时间。

(3) 开发的输电线路山火监测系统成功应用于工程实际, 成功监测到输电线路现场山火, 经现场验证, 监测准确度高。

### 参考文献

- [1] 胡军, 刘登远, 刘俊, 等. 咸宁输电线路防山火跳闸措施分析[J]. 湖北电力, 2011, 35(5): 29-30.  
HU Jun, LIU Deng-yuan, LIU Jun, et al. Analysis of fire prevention trip measures of Xianning power transmission line[J]. Hubei Electric Power, 2011, 35(5): 29-30.
- [2] 黄乐, 舒双焰. 南方电网 2010 年第一季度线路山火跳闸情况分析[J]. 广东电力, 2011, 24(3): 95-97.  
HUANG Le, SHU Shuang-yan. Analysis on fault trips caused by forest fire in CSG in the First Quarter of Year 2010[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(3): 95-97.
- [3] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 138-148.  
WU Tian, RUAN Jiang-jun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 138-148.
- [4] 胡湘, 陆佳政, 曾祥君, 等. 输电线路山火跳闸原因分析及其防治措施探讨[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(2): 73-78.  
HU Xiang, LU Jia-zheng, ZENG Xiang-jun, et al. Analysis on transmission line trip caused by mountain fire and discussion on tripping preventing measures[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(2): 73-78.
- [5] 陆佳政, 张红先, 方针, 等. 湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 99-105.  
LU Jia-zheng, ZHANG Hong-xian, FANG Zhen, et al. Result and its analysis of ice disaster monitoring of Hunan power system[J]. Power Svstem Protection and Control, 2009, 37(12): 99-105.
- [6] 陈金熠, 范春菊, 胡天强, 等. 考虑架空输电线路状态的线路覆冰监测系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 93-98.  
CHEN Jin-yi, FAN Chun-ju, HU Tian-qiang, et al. Study on monitoring system of transmission line icing considering the state of overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 93-98.
- [7] 昃萌, 廖敏. 故障电流限制器的晶闸管触发与监测系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 191-195, 206.  
ZE Meng, LIAO Min. Thyristor Triggering and Monitoring system of fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 191-195, 206.
- [8] 熊兰, 刘钰, 姚树友, 等. 污秽绝缘子紫外在线监测系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 186-191.  
XIONG Lan, LIU Yu, YAO Shu-you, et al. Ultraviolet online monitoring system for contaminated insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 186-191.
- [9] 任海鹏, 刘丁, 李琦, 等. 变电站绝缘子污秽闪络在线监测技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 77-81.  
REN Hai-peng, LIU Ding, LI Qi, et al. Design of insulator contamination online detecting technique for substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 77-81.
- [10] 尤飞, 陈海翔, 张林鹤, 等. 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 192-197.  
YOU Fei, CHEN Hai-xiang, ZHANG Lin-he, et al. Experimental study on flashover of high-voltage transmission lines induced by wood crib fire[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 192-197.
- [11] 吴田, 阮江军, 胡毅, 等. 500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 163-170.  
WU Tian, RUAN Jiang-jun, HU Yi, et al. Study on forest fire induced breakdown of 500 kV transmission line in terms of characteristics and mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 163-170.
- [12] 吴田, 胡毅, 阮江军, 等. 交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(5):

- 1115-1122.
- WU Tian, HU Yi, RUAN Jiang-jun, et al. Air gap breakdown mechanism of model AC transmission line under forest fires[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1115-1122.
- [13] 黄克慧, 张道印, 何婧, 等. 新一代多普勒天气雷达在林海监测中的应用[J]. 林业科技, 2007, 32(5): 33-36.
- HUANG Ke-hui, ZHANG Dao-yin, HE Jing, et al. Forest fires observations by using the new Doppler weather radar[J]. Forestry Science & Technology, 2007, 32(5): 33-36.
- [14] 李家国, 顾行发, 余涛, 等. 澳大利亚东南部森林山火 HJ 卫星遥感监测[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1221-1224.
- LI Jia-guo, GU Xing-fa, YU Tao, et al. Detection of Australian southeast forest fire using HJ satellite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(10): 1221-1224.
- [15] 肖利, 汤家法, 倪星航. MODIS 数据监测森林火灾方法的研究[J]. 四川测绘, 2008, 31(1): 10-13.
- XIAO Li, TANG Jia-fa, NI Xing-hang. A method of identify forest fire on MODIS data[J]. Survey and Draw of Sichuan, 2008, 31(1): 10-13.
- [16] 周小成, 汪小钦. MODIS 林火识别算法的验证分析[J]. 火灾科学, 2006, 15(1): 31-38.
- ZHOU Xiao-cheng, WANG Xiao-qin. Validation analysis of the algorithm for identifying forest fire based on MODIS data[J]. Fire Safety Science, 2006, 15(1): 31-38.
- [17] 王钊. 新一代极轨气象卫星 FY3A-VIRR 数据的地表火监测算法研究与评价[J]. 火灾科学, 2011, 20(3): 140-145.
- WANG Zhao. Research and evaluation of the algorithm of land surface fire detection based on FY3-VIRR data[J]. Fire Safety Science, 2011, 20(3): 140-145.
- [18] 杨珊荣, 李虎, 余涛, 等. 基于 MODIS 的秸秆焚烧火点识别原理及算法 IDL 实现[J]. 遥感应用, 2009(2): 91-97.
- YANG Shan-rong, LI Hu, YU Tao, et al. Principle of indentifying crop straw fire based on MODIS and its algorithm implementation using IDL language[J]. Remote Sense Application, 2009(2): 91-97.
- [19] 付迎春, 袁修孝, 宋妍, 等. 基于 MODIS 影像的森林火线检测方法[J]. 遥感学报, 2009, 13(3): 535-548.
- FU Ying-chun, YUAN Xiu-xiao, SONG Yan, et al. Automatic extraction of forest fire line using MODIS data by multi-spectral image gradient technique[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(3): 535-548.
- [20] 赵彬, 赵文吉, 潘军, 等. NOAA-AVHRR 数据在吉林省东部林火信息提取中的应用[J]. 国土资源遥感, 2010, 83(1): 77-80.
- ZHAO Bin, ZHAO Wen-ji, PAN Jun, et al. The application of NOAA-AVHRR to forest fire detection in eastern Jilin Province[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 83(1): 77-80.
- [21] FLASSE S P, CECCATO P. A contextual algorithm for AVHRR fire detection[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(2): 419-424.
- [22] 苏和, 刘桂香. 应用 NOAA 卫星数据监测与评估内蒙古草原火灾的初步探讨[J]. 中国草地, 1995(2): 12-14.
- SU He, LIU Gui-xiang. Application of NOAA satellite data to monitor fire disaster in inner Mongolia grassland area[J]. Grassland of China, 1995(2): 12-14.
- [23] CUOMO V, LASAPONARA R, TRAMUTOLI V. Evaluation of a new satellite-based method for forest fire detection[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(9): 1799-1826.

收稿日期: 2013-10-30; 修回日期: 2013-11-22

作者简介:

陆佳政 (1969-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高电压技术、电网防灾减灾技术研究;

吴传平 (1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事输变电设备防冰减灾技术、电能质量控制方面的研究。E-mail: jandom@126.com