

激光异物清除器装置研究

周维维, 樊卫华, 姜 姝

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 目前清除架空输电线路上的异物的方法主要是依靠人工方式或者借助无人机等遥控操作装置, 这些操作耗时耗力且带电作业有一定的危险性, 不能适应复杂的输电线路环境; 随着激光技术的应用越来越广泛, 利用激光清除电线异物已经成为现实; 为了更好地实现切割效果, 提高切割效率, 文章结合数字图像处理技术, 提出了一种基于转台伺服控制的激光除异物系统; 通过架设在双自由度转台上相对固定的摄像头和激光发射装置达到识别跟踪并切除异物的效果, 以图像解析结果为反馈, 控制转台的转动方向和角度, 从而确定激光发射的位置; 为了有效确定切割目标, 利用图像处理技术中的特征识别法进行异物识别与跟踪, 并通过 Hough 直线检测识别出线缆, 确定切割方向; 实验表明, 在转台满足精度指标的情况下可以有效清除规定范围内的目标异物, 切割速度较快, 适用范围较广。

关键词: 图像处理; 激光; 伺服控制; 异物清除

Research on laser foreign body remover device

Zhou Weiwei, Fan Weihua, Jiang Shan

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: At present, the method of removing foreign matter on overhead power transmission lines mainly relies on artificial means or control devices such as unmanned aerial vehicles. These methods are time-consuming, labor-intensive and can not be adapted to complex environments. With the application of laser technology more widely, using laser to remove foreign objects on wire has become a reality. In order to realize the cutting effect better and improve the cutting efficiency, the article presents a laser foreign body removal system based on servo control, combined with the digital image processing technology. By setting up a relatively fixed camera and laser emitting device on the two-degree-of-freedom turntable, the purpose of recognizing, tracking and removing the foreign object is achieved. The result of image analysis is used as feedback to control the rotation direction and angle of the turntable so as to determine the position of laser emission. In order to effectively determine the target, the foreign object recognition and tracking are carried out by the feature recognition method in the image processing technology. The Hough line detection is used to identify the cable and determine the cutting direction. Experiments show that in the case of turntable meet the accuracy of the target, the device can effectively remove the target within the scope of the specified foreign objects and can be adapted to more complex environments.

Keywords: image processing; laser; servo control; foreign body removal

0 引言

从工业生产到家用电器, 现代生活的方方面面都离不开电力系统的支持, 它的安全运行非常重要。通常在输电线路中, 各个导线之间都留有固定的安全间距, 防止天气变化等导致的电线短路。正常情况下, 只要导线间保持这个空气间隙, 架空输电线路就可以安全运行。但是如果在导线之间存在风筝线、网纱、气球和塑料布等非绝缘体, 那么, 导线之间就经常会通过这种物体放电, 尤其是雨雪

天气, 物体导电性能加强, 造成线与线之间短路, 使变电站的开关跳闸^[1], 严重影响到电网的运行安全。

带电清除异物是带电作业中安全风险最高的项目。目前, 对于输电线路进行异物清除的主要方法有两种, 一种是工作人员上塔清除, 包括停电后电工上线摘除以及等电位带电作业摘除。该方法耗时耗力、危险性高, 且不适用于复杂地形处的架空线路。同时由于异物种类、缠绕方式多种多样, 有些与电线缠绕紧密的异物, 操作危险性较高, 只能采用停电处理, 然而停电处理直接降低了供电的可靠性, 造成社会经济损失, 影响正常生活。另外一种使用较多的方法是无人机搭载喷火装置或者利用其他机械式遥控装置除异物, 该方法对设备的可操纵性要求较高, 其中一些方法也会对电缆造成损害。表 1 中列举了几种国内外常见的输电线路异物清除装置的类型及其技术特点^[1]。

通过观察上述表格可以发现, 这些方法大多要求切割装置与电缆有直接接触, 从而增加了工作难度。针对这个

收稿日期: 2017-11-27; **修回日期:** 2018-01-05。

基金项目: 国家自然科学基金(61673219); 江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修项目; 江苏省前瞻性联合研究项目(BY2016004-07); 江苏省“六大人才高峰”项目(XNYQC-CXTD-001); 天津市科技重大专项与工程项目(15ZXZNGX00250)。

作者简介: 周维维(1992-), 女, 江苏省盐城市人, 硕士研究生, 主要从事伺服控制方向的研究。

表 1 几种常见异物清除装置类型及特点

工作原理	优点	缺点
燃烧清除	操作简单；异物清除彻底；速度快。	需要携带燃料装置，易产生火花，造成火灾等意外；对环境要求比较高，大风大雨天不宜使用；只适用于可燃异物的清除；高温烧灼可能会损伤电缆。
夹持切割	操作可靠	操作复杂，过程慢；需要设计专用剪切工具及夹持工具；需要考虑异物悬挂的位姿；易损伤电缆。
开放刀具	结构简单	没有夹持工具，清除可靠性低。
特殊机构	结构巧妙	驱动方式多样，自动化实现困难；可能会损伤电缆。

问题，江苏省电科院在去年研制出一套手持式激光异物清除器。这套装置利用了激光单色性好、方向性强、能量高、定向能量传输效率高等特点，实现了远距离无接触清除异物。有实验表明，利用光纤激光器，采用 1080 nm 波段连续辐照，使其功率密度范围保持在 $25 \sim 30 \text{ W/cm}^2$ 之间，可以快速烧蚀风筝线、遮阳网等大部分常见钩挂异物，从而达到清除异物的目的^[2]，保证了利用激光清除异物的可靠性。但是，在距离较远以及大风天气电线晃动的情况下，手持式激光异物清除器无法准确快速地确定激光发射的方向。

近年来，随着图像处理技术的快速发展，其应用范围也越来越广。图像处理具有信息量大、实时性高、低风险、非接触等优点。在第一代手持式激光异物清除器的基础上，本文结合数字图像处理技术提出了一种新型激光除异物装置，利用架设在双自由度转台上位置相对固定的摄像头和激光发射装置，通过对转台的伺服控制达到识别跟踪并切除异物的效果。

1 激光除异物装置实现原理

架空线路上的异物主要是通过缠绕、重力支撑和粘附这三种方式与电线接触。激光清除异物的原理是通过精确控制高能激光束远程辐照异物与电线的接触部位，使异物被辐照部位吸收激光导致局部温度急剧升高后熔化，从而掉落，达到异物与电线分离的目的^[2]，如图 1 所示。与燃烧清除异物不同的是，激光除异物没有汽油等可燃物，不会造成可燃物掉落导致的火灾等安全隐患。有实验表明，由于高架线路均为金属，散热性能良好，通过控制激光束的功率密度维持在一定范围内，可以确保激光束不会对高压线路造成损害。

为了有效控制激光切割的位置与方向，本装置以手动控制为基础，根据操作界面视频显示结果将目标异物锁定在摄像头拍摄范围内，在操作人员点选需要切割的异物点后，图像处理系统解算出异物点与激光点的偏差，并控制伺服转台转动使激光点无差指向需要切割的异物点。根据图像分析上下扫描得出缠绕点所在电线，给出激光切割的

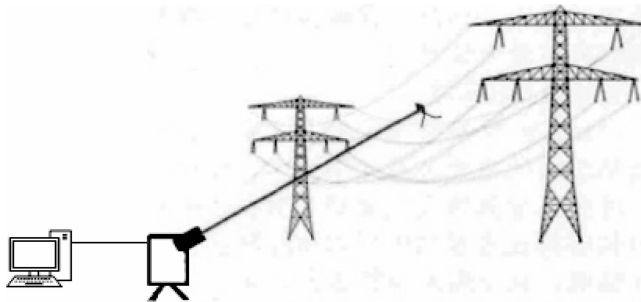


图 1 激光清除异物示意图

沿线方向，并由用户根据缠绕异物的特性选择激光切割的速度，最后打开激光发射装置，完成切割任务。切割过程中，图像处理系统始终保持跟踪状态，确保大风天气电线晃动对的情况下切割点也随之变化。

在控制结构与方法上，针对大风天气下架空线缆的晃动情况，同时考虑以视频作为目标位置的反馈，决定采用虚拟闭环的串级控制形式。根据虚拟闭环控制思想，以方位轴控制系统为例，结构图如图 2 所示。目标解算根据摄像头采集到的目标信息，解算激光点与目标之间的偏差，从而产生方位轴需要运动的角度指令信号；位置控制器根据解算后的指令信号以及方位轴测量到的实际角度信息，求解出偏差信号，然后根据内置控制律计算控制量，并输出驱动电机运转至消除角度偏差，准确指向目标。俯仰轴控制原理与方位轴相似。同时对方位轴和俯仰轴进行闭环控制，确保目标位置发生变化的情况下，转台可以根据图像处理结果进行快速响应。

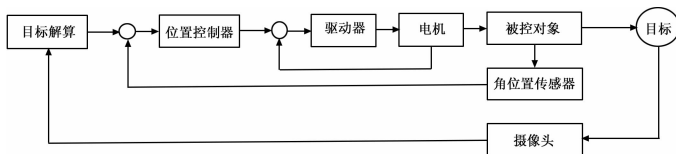


图 2 系统控制结构示意图

2 装置硬件结构

整套异物清除装置由激光器、镜头及工业相机、伺服转台及其控制器、工控机、激光控制箱及电源几个部分组成，其总体架构如图 3 所示。图中箭头方向表示通信方向，上位机与摄像机的通过 RS232 进行通讯，而上位机与伺服转台则通过 RS485 进行通讯。各部分作用及主要性能参数如下。

(1) 镜头及工业相机：

镜头及相机是系统的主要传感装置，负责采集目标的信息，用于对伺服转台和激光器的控制。考虑到系统对摄像机的分辨率、帧频等方面的需求，经过充分市场调研和技术论证，原理样机的摄像头和镜头采用 SONY 摄像机模块，型号为 SONY FCB-EV7500。

(2) 伺服转台及控制器：

伺服转台采用两轴结构，分别控制水平位置和俯仰角

度。伺服转台采用有刷直流电机, 其控制器开发采用基于 STM32f407 微控制器的 ARM 嵌入式开发系统。

(3) 工控机:

考虑到设备的便携性和可靠性以及接口的多样性, 选择嵌入式工控机为主机。x86 工控机作为伺服瞄准系统的控制核心, 实时采集工业相机的视频图像, 识别异物和线路。

(4) 激光器及其控制箱:

激光器采用光纤激光器, 选择波长 1080 nm, 使其功率密度保持在 25~30 W/cm², 可清除大部分布料和线材异物。激光器和工业相机固定在转台上, 跟随转台转动实现方位和俯仰的移动, 如图所示。激光器和相机经过校准后相对位置保持不变, 确保相机与光纤激光器同轴。

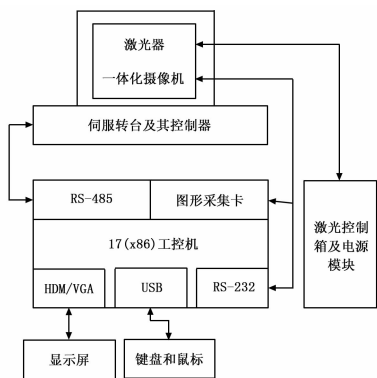


图 3 系统架构示意图

考虑到设备的便携性和可靠性以及接口的多样性, 选择嵌入式工控机为主机。x86 工控机作为伺服瞄准系统的控制核心, 实时采集工业相机的视频图像, 识别异物和线路。激光器和工业相机固定在转台上, 跟随转台转动实现方位和俯仰的移动, 硬件结构如图 4 所示。激光器和相机经过标定校准后相对位置保持不变, 确保相机与光纤激光器同轴。

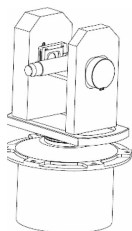


图 4 转台结构图

3 系统软件结构

伺服瞄准控制器采用基于 x86 的嵌入式工控机为主机, 操作系统采用 Windows7 以上版本, 开发采用 Visual C++，图像处理部分调用 Open CV 数据库, 包括灰度化、滤波等基本操作和 Hough 直线检测等目标特征分析。针对系统处理的实时性要求, 采用多线程编程技术和 MFC 面向对象的程序设计方式, 利用 MFC 控件搭建 GUI。软件功能主要流程如图 5 所示。首先初始化伺服转台并打开摄像头,

使转台自转一周确保转台处于正常工作状态, 然后根据操作者观测到的视频图像手动控制调整转台方位和俯仰位置, 待目标异物出现在视野中为止, 再手动框选目标区域便于进行异物跟踪和线性识别, 最后进行模拟切割确认无误后启动激光发射器进行切割任务。

软件主要流程如图 5 所示。

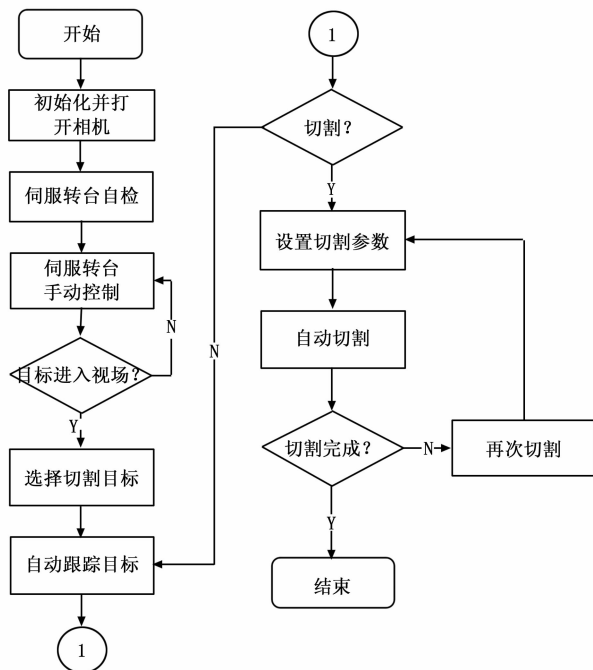


图 5 软件流程图

软件系统主要包括界面、视觉处理和伺服控制等几个部分。

系统控制界面用于人机交互。界面设计如图 6 所示, 采用 MFC 面向对象的程序设计方式, 主要分为视频显示、转台控制、相机设置、功能选择、切割参数调整和系统运行日志以及系统状态提示等几个区域。操作人员通过界面中的视频显示区可以获取并观察视野内的图像, 并通过选择界面上的上、下、左、右操作按钮控制伺服转台的转动, 使视野切换到异物所在区域, 转台转速设置了粗、细两个调节按钮, 当视野接近目标区域时可以选择细调, 防止转速过快错过目标物。用户可以根据所要进行的操作选择相应的功能按钮, 比如转台的自检或关机、目标选取、异物切割、切割速度选择等; 运行日志显示区详细记录每一步操作过程, 便于操作过程中出现故障时进行问题排查; 状态显示栏可以显示伺服状态和跟踪状态以及转台的方位和俯仰角度, 用户可以通过指示灯直观地判断装置的工作状态是否正常。

视觉处理模块主要包括视频采集、目标检测和参数解算这三个部分。图像处理是视频跟踪系统中的关键部分, 需要快速准确识别目标物体, 为系统提供控制信号, 同时在闭环控制系统中提供反馈信号。图像处理基本分为三个阶段^[3]。第一个阶段是图像处理阶段, 第二个是图像分析

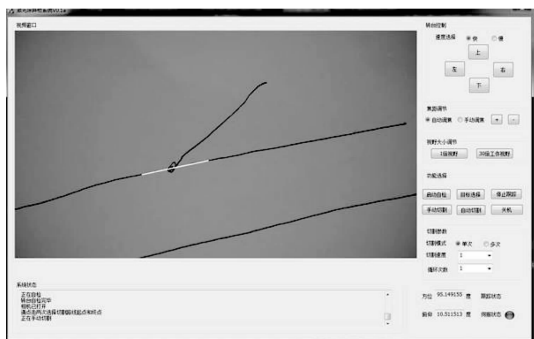


图 6 装置操作界面

阶段，第三个是图像理解阶段。图像处理的目的是为以后的处理工作提供方便，包括灰度化处理、滤波噪声、锐化目标边界等基本操作；图像分析是对处理图像中感兴趣的部分进行分割、提取、测量、检测等，简化图像描述并突出感兴趣部分的描写，提供描述目标特性的数据，如 Hough 图形变换检测等；图像理解是根据前两个阶段的处理结果，找出图像中的特定目标和客观世界的联系，并用于指导和规划行为。视频采集采用索尼电动变焦摄像头，使工作范围可以达到 120m，并采用 60 帧/秒的采集速率，确保视频采集的连续性和实时性。摄像机采集到的视频信息通过 RS485 实时显示在界面的视频显示区供用户观察和选择，一旦用户选定异物，系统开始进行图像处理并获取有效位置信息，通过目标位置与预先标定的激光点的位置偏差进行参数解算得出相应的控制信号并反馈给伺服转台。另外，在目标检测过程中，通过 Hough 直线变换算法检测出图像中的电线，通过自上而下或者自下而上扫描检测出的直线找出与异物相交的电线，从而确定异物连接点以及沿线切割的方向。

伺服控制模块主要分为两部分，一是图像处理部分的基于位置反馈的视觉控制模块，包括跟踪、通信和切割控制等；二是转台控制部分的电机伺服控制模块，包括转台自检、上位机与转台之间的通讯等。

其中，伺服跟踪是保证切割效率的关键。由于事先将激光光轴标定在视频图像的正中间，所以需要跟踪算法将目标物体移动到视野中央。另外，由于大风天气等情况下异物会发生晃动，如果晃动幅度过大容易影响切割效果，所以需要对外物进行实时跟踪，视觉伺服可以根据图像处理的结果实时输出异物与光轴即图像中心的位置偏差，从而确定转台所要移动的角度。整个视觉伺服系统工作流程如图 7 所示，本文采用 OpenCV 库中跟踪性能较好的 KCF 跟踪器进行目标异物的跟踪。

另一方面，含有方位轴和俯仰轴的双轴伺服转台部分采用电机伺服控制系统中经典的三环控制，由内到外分别是电流环、速度环和位置环，依次进行参数整定，力求减小电机在运行情况下的震动超调等，其中电流环为定值不需要进行调整。为了保护台体，软件部分对原理样机进行了位置环的限制，其中方位轴实现水平方向 $-170^{\circ} \sim 170^{\circ}$

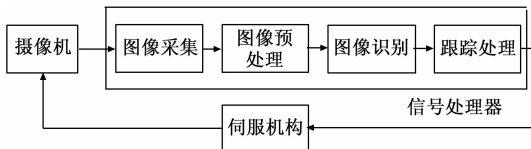


图 7 视觉伺服系统结构图

旋转，俯仰轴为垂直方向 $-15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，基本可以确保实验场地的异物能调节到视场中央。两轴控制方法相似，均采用经典的 PID 控制方法，分别以各轴的速度和位置为控制量调整相应参数。速度环可以调节相应转轴的速度范围，控制精度为 $0.02^{\circ}/s$ ，位置环在满足系统需求的前提下经充分实验设为定值， $-32\ 768 \sim 32\ 767$ 对应于 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ，即控制精度约为 $0.005\ 5^{\circ}$ ，可见转台对于精度的要求比较高，所以决定采用伺服控制方法。上位机通过接收视觉处理模块发送的位置偏差信息，并结合其余参数解算出控制转台的方位轴和俯仰轴的指令信号，通过通讯模块将指令信号发送给转台使其进行伺服运动。在实际的操作过程中，为了避免因速度突变造成扭矩过大从而导致过流的情况，一般速度的调节范围不宜过大，在本装置中，速度调节范围要求控制在 $5\ r/m$ ，即 $0.5^{\circ}/s$ ，使系统具有良好的跟随性能。

4 实验结果与分析

为了验证多根电线的情况下，算法是否可以识别缠绕异物的线缆并进行沿线切割，选取大约 60 米左右的电线为目标线路，以视频图像中与电线重叠的树叶作为目标异物。转动转台使异物出现在视野内，点击目标选择按钮并在左侧视频显示区选取需要清除的异物，转台根据目标点位置解算结果产生的位置偏差信号自动转动，将目标调整至中心位置（同时也是激光点位置），白线部分为识别出的缠绕异物的电线，即切割示意方向，待目标跟踪稳定后点击切割按钮，转台根据选定的速度进行沿线切割直至异物脱落检测不到新的异物点。实验表明，系统可以准确实时地跟踪选定的目标异物，并选取相应的线缆确定切割方向。实验示意图如图 8 所示。



图 8 实验示意图

考虑到树叶与电线之间不存在相对晃动的情况，实验中模拟电线及异物的情况，将电线系在树干上固定个，并在悬空电线上固定悬挂一个白色异物。通过人为干预在一

定范围内晃动电线模拟大风天气下的情况。实验表明, 异物和电线一起晃动的情况下, 也能实时跟踪选定异物以及准确识别视频图像中的电线, 确定切割方向。实验示意图如图 9 所示。

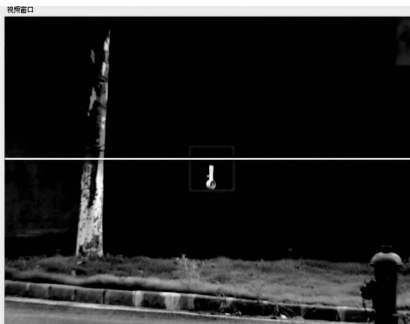


图 9 实验示意图

5 结论

本文结合数字图像处理技术提出了一种基于伺服控制转台的激光除异物跟踪瞄准系统, 从激光清除异物的可行性出发, 利用伺服控制原理, 对视频采集到的图像进行分析得到目标异物与标定激光点的相对位置信息, 并解算得出相应的转台控制信号, 通过控制转台的方位轴和俯仰轴精确完成沿线切割任务。最后通过模拟实验验证了该方案的可行性。考虑到视觉图像处理存在时延, 从而会在一定程度上影响跟踪切割的效果, 后期可以使用嵌入式实时操

作系统, 利用 Open CV 以及 Qt 开发相应的界面, 以提高系统的实时性。另外, 考虑到高架线路背景的多样化和复杂性, 开始时仍需要手动选择需要切割的目标异物, 后期可以投入更多时间和精力采集各种环境下的高架线路背景图片, 形成一个图片库并根据一定的图像算法对其进行训练, 通过模板匹配达到自动搜索并确定异物的目标, 从而提高切割效率, 实现激光异物清除装置的全方位自动化。

参考文献:

- [1] 曹燕军. 输电线路异物清除机器人机构设计与分析 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
- [2] 梁伟, 陈杰, 刘洋, 等. 清除架空线路异物的新型装置及其试验研究工程 [J]. 中国电机 (技术版), 2015, 9: 57-59.
- [3] 寇军. 输电线路清障机器人机器视觉系统的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [4] 刘明亮, 杨厚峰. 导线易漂浮物清除上具的研制与应用 [J]. 自动化博览, 2011, 2: 185-187.
- [5] 付克勤. 架空线路异物清除装置的研制 [J]. 电工之友, 2015, 12: 21.
- [6] 周辉, 杨颖锐, 杨生兰. 输电线路异物清除装置研究 [J]. 电力科技, 2016, 7: 174-175.
- [7] 陈友辉. 高压输电线路除冰机器人视觉引导技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [8] 曹燕军. 输电线路异物清除机器人机构设计与分析 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
- [9] 梁伟, 陈杰, 刘洋, 等. 清除架空线路异物的新型装置及其试验研究工程 [J]. 中国电机 (技术版), 2015, 9: 57-59.
- [10] 寇军. 输电线路清障机器人机器视觉系统的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [11] 刘明亮, 杨厚峰. 导线易漂浮物清除上具的研制与应用 [J]. 自动化博览, 2011, 2: 185-187.
- [12] 付克勤. 架空线路异物清除装置的研制 [J]. 电工之友, 2015, 12: 21.
- [13] 周辉, 杨颖锐, 杨生兰. 输电线路异物清除装置研究 [J]. 电力科技, 2016, 7: 174-175.
- [14] 陈友辉. 高压输电线路除冰机器人视觉引导技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [15] 黄海峰. 百度张磊: 2013 年手机吸费类病毒应用“暴增” [J]. 通信世界, 2013, (34): 45.
- [16] 刘剑, 苏璞睿, 杨珉, 等. 软件与网络安全研究综述 [J]. 软件学报, 2017, (7): 1-25.
- [17] 胡文君, 赵双, 陶敬, 等. 一种针对 Android 平台恶意代码的检测方法及系统实现 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47 (10): 37-43.
- [18] Xu L, Zhang D, Alvarez M A, et al. Dynamic Android Malware Classification Using Graph-Based Representations [A]. 2016 IEEE 3rd International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud) [C]. IEEE, 2016: 220-231.
- [19] 温博文, 董文瀚, 解武杰, 等. 基于改进网格搜索算法的随机森林参数优化 [J]. 计算机工程与应用, 2017 (5): 1-5.
- [20] 张玉玲, 尹传环. 基于特征频率的安卓恶意软件异常检测的研究 [J]. 智能系统学报, 2017 (3): 1-5 (2017-03-17).
- [21] 侯苏, 杜彦辉, 芦天亮, 等. 基于 K-means 算法的 Android 权限检测机制研究 [J]. 计算机应用研究, 2018 (4): 112-117.
- [22] 翟红玉. 基于 SVM 的网络恶意程序检测方法研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2015, (12): 77-78.

(上接第 122 页)

- [2] 马绍菊, 万良, 杨婷, 等. DApriori: 一种基于 Apriori 的 Android 恶意应用检测方法 [J]. 计算机应用研究, 2017 (3): 1-5.
- [3] 卢正军, 方勇, 刘亮, 等. 基于上下文语境的 Android 恶意行为检测方法 [J]. 计算机工程, 2017 (9): 1-6.
- [4] 杨欢, 张玉清, 胡予濮, 等. 基于权限频繁模式挖掘算法的 Android 恶意应用检测方法 [J]. 通信学报, 2013, 34 (1): 106-115.
- [5] 姜海涛, 郭雅娟, 陈昊, 等. 一种混合的 Android 恶意应用检测方法 [J]. 计算机应用研究, 2016 (6): 1-5.
- [6] 黄伟庆, 丁昶, 崔越, 等. 基于恶意读写器发现的 RFID 空口入侵检测技术 [J]. 软件学报, 2017, (10): 1-15.
- [7] 张玉玲, 尹传环. 基于特征频率的安卓恶意软件异常检测的研究 [J]. 智能系统学报, 2017 (3): 1-5.
- [8] 梁宇文, 何庆, 许敬伟, 等. 代码审计技术方案 [J]. 信息技术与信息化, 2015 (9): 61-62.
- [9] 李晓丽. 基于 LKM 机制的 Linux 安全模块的研究 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26 (6): 97-100.
- [10] 沙泓州, 刘庆云, 柳厅文, 等. 恶意网页识别研究综述 [J]. 计算机学报, 2016, 39 (3): 529-542.