

大型无人直升机电力线路全自动巡检技术及应用

彭向阳, 钱金菊, 麦晓明, 王柯, 王锐, 易琳

(广东电网公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 大型无人直升机电力线路巡检存在环境适应性差、智能化程度低、多学科交叉难度大等问题, 现阶段无人直升机巡检主要依赖于人工地面操作, 为了提高巡检效率和安全性, 研究大型无人机全自动巡检技术具有重大意义。提出了大型无人机全自动巡检概念, 分析了无人机全自动巡检的必要性, 论述了实现复杂环境下大型无人机超低空、超视距安全巡检涉及的关键技术, 包括实时差分定位、无人机中继通信、自主避障、高精度位姿测量、吊舱自动追踪、飞行计划和航迹规划、任务规划和任务控制等, 并将大型无人直升机全自动巡检技术首次应用于我国电网输电线路巡检, 巡检结果验证了大型无人机全自动巡检技术的有效性和先进性。大型无人机全自动巡检建立了一种高效、智能、全新的电力巡检模式, 该项技术的发展进步对提高我国电网输电线路智能化巡检水平具有显著促进作用。

关键词: 无人直升机; 输电线路; 全自动巡检; 飞行计划; 任务规划; 超低空超视距; 高精度位姿测量

Automatic Power Line Inspection Technology of Large Unmanned Helicopter and Its Application in Power Grid

PENG Xiangyang, QIAN Jinju, MAI Xiaoming, WANG Ke, WANG Rui, YI Lin

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: There are a lot of problems such as bad environment adaptability, low degree of intelligence, multidisciplinary cross and more difficulty for power line inspection of large unmanned helicopter. At present unmanned helicopter patrol relies mainly on artificial ground operation, in order to improve inspection efficiency and safety, it is of great significance to study automatic inspection technology of large unmanned helicopter. This paper puts forward the concept of full automatic inspection, gives analysis on necessity of automatic inspection, discusses the key technologies on safety inspection of over low altitude and beyond visual range, including real-time differential positioning, communication relay, autonomous obstacle avoidance, high precision measurement of position and attitude, automatic photoelectric tracking, flight plan and path planning, task planning and control. Automatic inspection technology is used in transmission line inspection of power grid in China for the first time, inspection results show that this technology is advanced and effective. Automatic inspection technology represents an efficient, intelligent, and new power inspection mode, the development and progress of the technology has a significant role in promoting intelligent operation and maintenance level of power grid in China.

Key words: unmanned helicopter, transmission line, automatic inspection, flight plan, task planning, over low altitude and beyond visual range, high precision measurement of position and attitude

0 引言

为实现电网安全运营, 需要对输电线路进行定期或特殊巡检工作, 以便及时发现输电设备的紧急或重大缺陷, 排除线路通道的外部安全隐患, 防止

发生设备事故或外力破坏事故。但迄今为止, 我国电网输电线路仍主要依赖于人工巡检方式, 不仅劳动强度大、工作条件艰苦, 而且巡检效率低, 已不能适应现代电网发展和安全运行的需要。有人直升机巡检作为目前一种相对成熟的巡检技术, 已在我国电网推广应用。但有人直升机巡检存在一次性投资大、巡检成本高、机载人员安全风险高、空域管

基金项目: 南方电网公司 2013 年重点科技项目 (K-GD2013-030)

Foundation item: Supported by the 2013 Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid (K-GD2013-030).

制以及对飞行员技术水平、心理承受力要求高等问题,目前还不能完全满足不同电压等级、复杂地形条件和各种特殊灾害条件下的巡检需求^[1]。

近年来,国内外相关技术的发展为无人机电力线路巡检提供了条件,特别是国产无人机平台安全性和荷载能力的提高,高性能、轻小型机载传感器的出现,以及自动控制、导航定位、测控通信技术的进步等,极大地促进了无人机电力线路巡检技术的发展^[2-3]。无人机搭载巡检设备巡线具有投资小、巡检成本低、自动化、智能化等特点,能够在较大程度上解决有人机巡检和复杂地理条件下人工巡检安全风险高、技术要求高、劳动强度大等问题,可实现对输电线路安全快速的巡检,具有重要的研究价值和应用前景,已成为电力巡检领域的一个研究热点^[4-6]。

目前常用的无人机巡检模式大多为短距离、程控飞行辅以自动定向拍照,具有光电吊舱的无人机则采用人工地面控制吊舱的方法,将吊舱对准巡检目标进行观察^[7]。这种模式在小规模应用条件下简单易行,操作方便。但是利用大型无人直升机进行长距离输电线路多传感器巡检工作,由于线路较长、工作时间长、操作设备多,如果采用人工地面控制吊舱作业方式,工作强度将非常大,作业人员高度紧张、容易疲惫出错。

并且长距离巡检一般采用中继通信,存在较大传输时延以及图像丢失或传输质量差等问题,人工地面控制对线路目标准确跟踪和精细巡检难度大,无法保证整个巡检工作顺利开展,因此有必要研究大型无人机全自动巡检技术。

本文提出了大型无人机电力线路全自动巡检理念,概述其技术内涵。在此基础上详细介绍了实现大型无人机自动安全飞行、大型无人机多传感器自动任务检测的关键技术,并将全自动巡检技术首次应用于电力线路规模化巡检,巡检结果验证了大型无人机全自动巡检技术的有效性。

1 大型无人机全自动巡检技术概述

目前,我国电网中、小型无人机电力巡检逐步达到了实用化水平,但存在巡检距离短、载荷能力小的局限性,不能满足电网输电线路规模化巡检的需求。大型无人直升机巡检距离长、载荷能力大,具备装载高性能、多种传感器对输电线路进行长距离巡检的可行性^[8-10]。

采用大型无人机进行长距离输电线路巡检,必须同时解决无人机复杂地形下飞行安全和海量数据高效采集问题。大型无人机是高度智能化系统,必须充分利用其自动化程度高的特点,巡检过程中较多的人工干预不仅降低巡检效率,还会降低飞行安全性。因此,大型无人机电力线路全自动巡检技术,包括以下 2 方面内容:

1)大型无人直升机按事先制定的飞行计划和航迹规划,实现复杂地形条件下的全自动、超低空、超视距安全飞行;

2)大型无人直升机机载多传感器任务设备按事先制定的任务规划,全自动执行线路设备和通道检测任务,巡检过程传感器自动检测,完全无需人工干预。

除此之外,大型无人机全自动巡检还包括开发无人机巡检智能诊断专家系统,对无人机自动采集的可见光、红外、紫外、激光点云等海量多源巡检数据进行自动处理、智能诊断或人工交互诊断,提高线路缺陷隐患诊断效率。限于篇幅,这部分内容另文论述。

2 大型无人机自动安全飞行技术

2.1 实时差分定位

为保证复杂地形条件下无人机超低空、超视距安全飞行,需要采用高精度导航定位技术。本文采用差分定位^[11]提高 GPS 定位精度。差分定位系统由 3 部分组成:基准站接收机、差分数据链路和差分流动站接收机。差分系统组成如图 1 所示。

本文选用的差分基准站接收机,可提供米级到厘米级的定位精度,基于 GNSS 差分数据链路接收差分改正数据,进行实时差分改正。GNSS 差分数据链路由地面测控车和飞机之间提供专用差分频道构成,与飞行控制链路共享链路带宽,当直接通信受到影响时,可控制链路控制软件,选用中继设备接收差分数据。流动站实时接收基准站的差分数据,与本地接收的 GPS 观测数据构成差分观测,实时改正观测误差,获得高精度的差分定位结果。基于上述原理,可以使定位精度提高到厘米级,从而为无人机安全自动飞行提供有力保障。

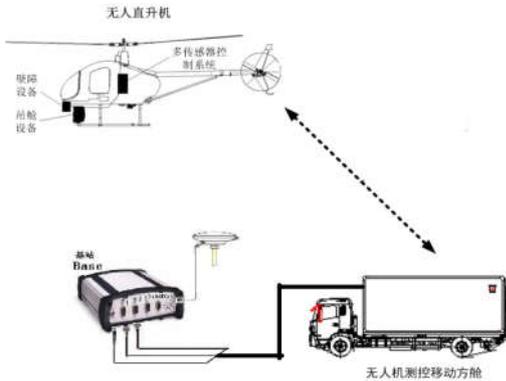


图 1 差分定位系统组成

Fig.1 composition of difference positioning system

2.2 无人机中继通信

为克服地形阻挡、多径效应、频率选择性衰落和输电线路强电磁干扰等因素对无人机通讯链路的限制,研制了电力巡检无人机数据链路中继系统,为无人机电力线路巡检长距离、超视距飞行以及实时图传提供稳定信号通道支持,保证无人机在巡检作业低空飞行时通信正常^[12]。

通讯链路采用无线通信组网方式,图像遥测及遥控采用 COFDM 数字通信技术,使其具有较强的绕射能力和抗多路径干扰能力。无人机地空中继链路通信分为 2 种工作模式,即中继模式和无中继模式。中继模式下地面站与目标机通过中继机进行数据通信,无中继模式下地面站与目标机直接数据通信。2 种模式可自动切换,以提高通讯质量。无人机中继通信示意图如图 2 所示。

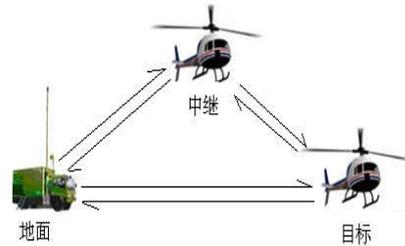


图 2 无人机中继系统

Fig.2 UAV relay system

无人机中继链路系统由地面站模块、中继机模块和目标机模块 3 大部分组成,使用高级编程语言编制地面站链路操控软件,具有可视化用户界面,提供节点运行状态、手动调整节点配置参数、历史数据分析和存储、故障实时自动告警等功能。

2.3 自主雷达避障

为保证无人机超低空、超视距复杂环境下的安全作业,需要实现自主避障预警。本文研发了一种多功能、带伺服机构的毫米波雷达避障系统^[13-14],全面优化了雷达避障策略。该系统可以全天时、全天候探测高压线路导线、铁塔、树木和丘陵等物体,具有足够的机动避障时间;避障系统能对 200 m 范围内的导地线级障碍物进行自动识别和自主避障,实现障碍避让或悬停返航等避障策略;采用毫米波雷达,可以在在不显著增加无人机电载荷的前提下,保障无人机飞行安全。

雷达避障系统采用举手表决制对障碍物进行检测,即在巡检过程中,飞控器实时扫描避障系统数据,扫描周期为 20 ms,100 ms 内扫描 5 次,如检测到 3 次障碍,则判定障碍物存在,采取的避障措施包括:

- 1) 首先判断障碍物距离,在一定范围内(该范围根据当前飞行速度决定,速度越小,相应的避障距离越小)进行避障动作,否则继续巡线;
- 2) 障碍物在设定距离范围内时,飞控系统发送避障指令,即直升机减速同时抬高 4 m,且直升机高度调节到位后才进行下一次避障检测;
- 3) 同一航段中,允许两次避障动作,第三次检

测到障碍物时，则判断该航线设置存在问题，不适合继续作业，此时直升机先减速滞空，待速度降为零后，原地拔高到安全高度（该安全高度由遥测软件上传），以 15 m/s 速度返回至起飞点；

4) 直升机在本航段的避障次数不影响下一航段的避障计数，即进入下一航段飞行后，避障次数清零；

5) 直升机在本航段避障后，拔高到一定高度，不影响下一航段巡检目标点高度，即在下一航段中如果没有障碍物，目标点与避障前的目标点高度一致。具体的飞控避障流程如图 3 所示。

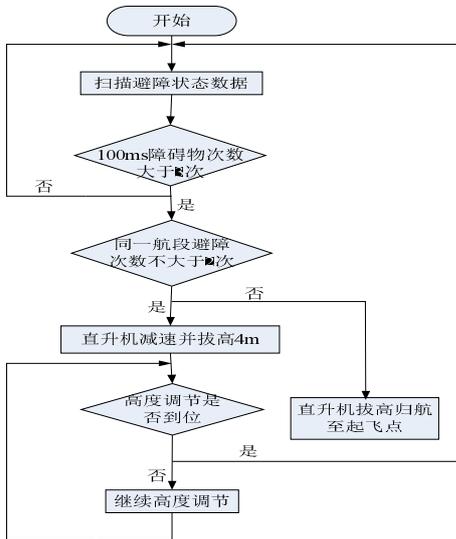


图 3 避障处理流程图

Fig.3 Obstacle avoidance processing flow chart

2.4 飞行计划和航迹规划

为满足无人机全自动巡检的需求，事先应按照电力线模型和地形数据进行飞行计划和航迹规划。在深入研究无人机自动巡检需求基础上，基于 ArcEngine 开发了一套巡检飞行计划和航迹规划软件^[15]。该软件能够快速有效地完成无人机飞行计划和航迹规划，架构设计如图 4 所示。具体工作程序是：先确定巡检任务（快速巡检或精细巡检），然后依次进行航迹布设、航点编辑、任务点布设，最后自动生成任务文件和航迹点坐标。

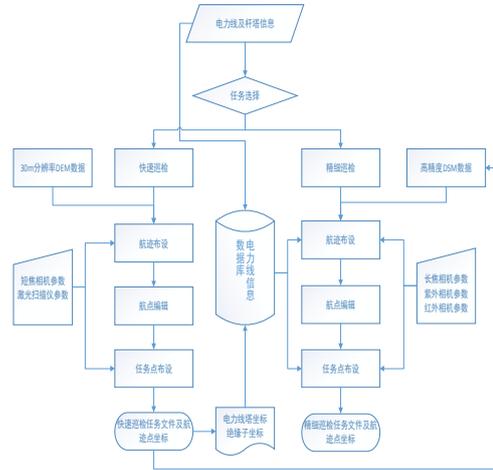
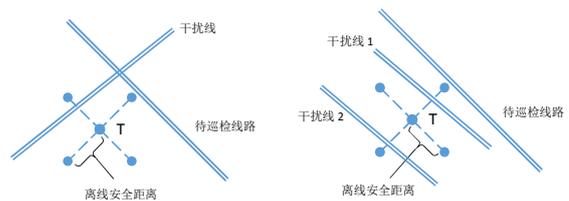


图 4 飞行计划和航迹规划软件设计

Fig.4 Software design of flight plan and route planning

电力线路分布交错复杂，作业区域内干扰电力线可能对无人机安全产生威胁，主要包含两种情况，一是巡线航迹与电力线交叉，二是巡检航迹到其它电力线的距离小于安全距离。为保证无人机与电力线的安全距离，巡线航迹布设后需对以上两种情况进行检测并优化，具体步骤如下：

- 1) 首先计算巡线航迹上某一航迹点 T 到所有电力线段的距离，当小于离线安全距离时，将此段电力线标记为（预判）可能影响巡线航迹的干扰线。
- 2) 以当前航迹点 T 为中心，沿巡线走向及其垂直的四个方向，以离线安全距离为长度作四条线段，分别与所有电力线段进行交叉判断。



(a) 第一类异常点 (b) 第二类异常点

图 5 无人机巡线航迹安全检查

Fig.5 Safety inspection of UAV flight route

3) 当四条线段皆与当前电力线无交叉时，当前电力线段对航迹点无影响，继续对其它电力线段进行判断，当四条线段中有一条与当前电力线段交叉，则标记（判定）当前点为巡线航迹异常点，当前电力线段为干扰线。

4) 沿巡线走向的两条线段与干扰线交叉时，则

此航迹点属于第一类异常点，如图 5(a)。当前航迹点高度与干扰线高度的差值小于无人机线上安全高度时，设置当前航迹点高程值等于干扰线高度加上无人机线上安全飞行高度，反之保留原始高度不变。

5)当与巡线走向垂直的两条线段与干扰线交叉时，此航迹点属于第二类异常点，如图 5(a)。当干扰线在巡线航迹与待巡检线路之间时，将巡线航迹点沿与待巡检线路走向垂直方向向外侧偏移，直到当前航迹点到干扰线的距离大于安全距离；当巡线航迹在干扰线与待巡检线路之间时，则改变航迹点高程以保证线上安全飞行，计算步骤同 4)。

6)按照以上步骤依次对所有航迹点进行异常检测及优化。

3 大型无人机多传感器自动任务检测技术

3.1 多传感器集成同步与检校

为解决目前无人机巡检中传感器单一、数据间关联度不大且后处理多为人工方式的弊端，研究采用了多传感器集成方式。通过牢固可靠的物理连接，将多种传感器的光轴进行统一，通过时间同步技术实现多传感器数据的时间坐标对准，通过 POS 系统（位置姿态系统，position and orientation system）数据解算得到外方位元素，将各传感器数据在空间上对准，实现多传感器集成。传感器载荷安装框架设计以“系统质心尽量靠近旋转轴线”为方针，在安装框架中集成安装了长短焦相机、红外热像仪、紫外成像仪、激光扫描仪以及 IMU（惯性测量单元，inertial measurement unit）。整体结构及传感器安装方式如图 6 所示。

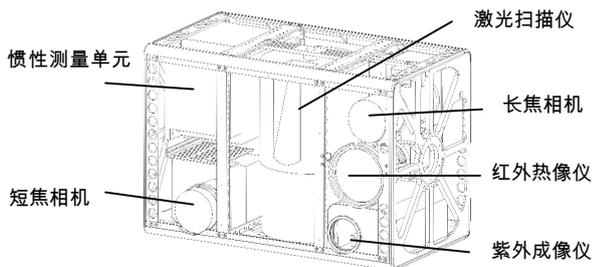


图 6 无人机多传感器集成框架图

Fig.6 UAV multi-sensor integration framework

为实现多传感器数据在空间上的准确配准，提高无人机电力巡检准确高效的数据获取能力，对多传感器系统进行了集成检校，主要检校参数包括：GPS 天线相位中心与 IMU 几何中心之间的偏心分量、长焦相机与 IMU 本体坐标系之间的线元素偏心分量及角元素偏移值、红外相机与 IMU 本体坐标系之间的线元素偏心分量及角元素偏移值、激光扫描仪与 IMU 本体坐标系之间的线元素偏心分量及角元素偏移值。通过地面检校和飞行检校，较为准确确定了上述各项参数，为实际线路飞行巡检工作打下了基础。

3.2 高精度位姿实时测量

高精度 POS 系统为无人机吊舱提供高精度位姿基准，并为惯性稳定平台提供精确指向。本文在分析国内外 POS 发展与应用现状的基础上^[16]，选取体积重量较小的光纤陀螺作为核心敏感元件，为减少 IMU 部分的体积和质量，设计 IMU 时只完成陀螺仪和加速度计等传感器的数据采集，并以数字信号形式将数据采集结果发送给 POS 导航计算机，其中 POS 导航计算机负责系统数据的时间同步、融合计算、存储及对外交互。整个 POS 系统的组成框图如图 7 所示。

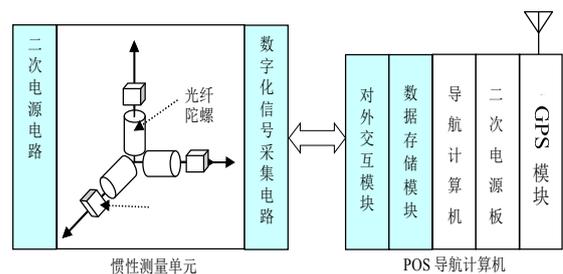


图 7 高精度光纤陀螺 POS 组成框图

Fig.7 High precision fiber optic gyro POS composition diagram

3.3 光电吊舱自动跟踪

为使无人机吊舱载荷系统在运动状态下对巡检目标进行准确拍照和成像，必须解决以下两个实际问题：1)如何在运动状态下使吊舱载荷控制系统实时掌握目标及载荷传感器在三维空间中的精确坐标；2)如何保证在运动及振动状态下相机、视频摄

像机能始终精确指向目标。针对上述问题，采用双闭环控制策略实现吊舱自动跟踪^[3]。

吊舱自动跟踪的基本原理基于双闭环动态控制策略，具体算法的流程如图 8 所示。

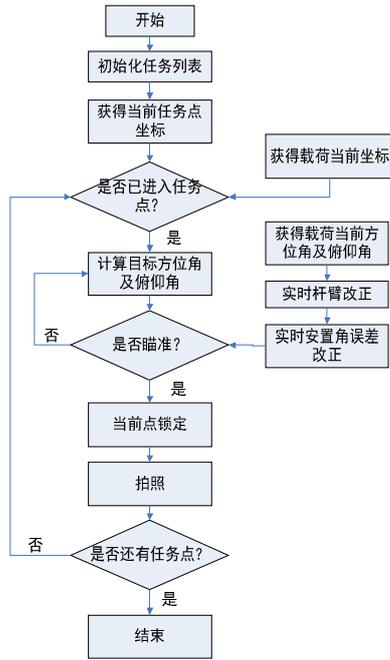


图 8 光电吊舱传感器目标自动跟踪算法

Fig.8 Automatic target tracking algorithm for optoelectronic pod

利用获得的目标及载荷精确三维坐标，实时计算吊舱载荷调整的方位角和仰俯角。其中，外环采用距离控制策略，使载荷足够接近任务点后才启动瞄准和跟踪，确保任务执行时获取足够的图像分辨率。内环采用姿态控制策略，利用从 POS 得到的实时坐标及待跟踪目标坐标，实时计算出稳定平台需要调整的俯仰角及方位角，驱动稳定平台方位和俯仰电机分别执行水平、垂直旋转动作，从而实现目标指向和自动跟踪。

3.4 任务规划和任务控制

大型无人机多传感器电力线路自动巡检需要按事先制定的任务规划，将设计的任务计划导入任务控制系统，实现全自动执行设备检测任务。基于此需求，研究开发了任务规划和任务控制软件。该软件系统可以使无人直升机在飞行过程中自动执行传感器检测动作，无需人工干预。

电力线路巡检任务中的相机曝光点在巡检航迹基础上布设，以保证无人机沿巡检航迹飞行时相机能够获取电力线设施具有指定重叠度的影像数据。布设完成相机曝光点之后，稳定平台姿态计算根据各个曝光点设计相应的平台姿态，以保证传感器获取目标对象的完整数据。稳定平台姿态计算具体步骤如下：

- 1) 首先获得各个传感器的视场角。
- 2) 计算曝光点上对地相机到任务点扫描带宽两侧之间的夹角，并结合相机当前姿态，计算平台可摆动的角度范围；结合各传感器扫描视角，计算各传感器对应平台的可摆动范围。
- 3) 搜索所有传感器对应平台对应的可摆动范围的正向和负向最小值的绝对值，计算其中间角度作为平台的预期姿态。
- 4) 将稳定平台现有姿态与预期姿态相比较，当大于某一阈值时，调整平台姿态，小于阈值时不需调整。

无人机巡检任务控制软件的机上部分无操作界面，地面部分支持用户对多传感器系统进行控制、查看任务执行状态及传感器工作状态等，软件系统界面如图 9 所示。

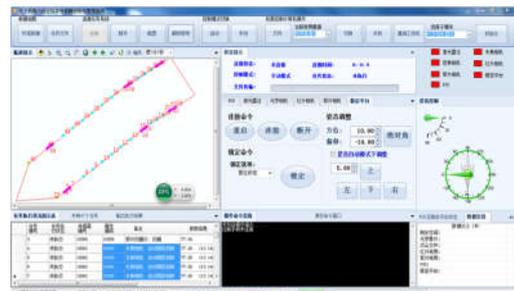


图 9 无人机任务控制软件

Fig.9 UAV mission control software

该系统软件能载入并显示栅格及矢量数据，加载相关任务文件，控制系统及传感器，实时显示任务执行状况、无人机飞行坐标、稳定平台实时姿态以及各传感器数据状态，并支持地面人工操作，以在必要时调整稳定平台角度、速度以及锁定等功能。

4 大型无人直升机全自动巡检技术应用

4.1 巡检系统研发及集成调试

在全自动巡检技术研发基础上，成功研制了成套巡检装备，确认了巡检系统功能性能^[17-18]。同时，开发了智能诊断专家系统，能够对输电线路状态进行安全诊断。

2014 年 7 月，大型无人直升机全自动巡检系统在广东电网清远 220 kV 韶林线进行了首次实际带电运行线路巡检试验，对线路通道安全距离、异常发热、异常放电以及设备外观结构缺陷进行了全方位的检测和诊断，效果良好。



图 10 无人机起飞降落点实景

Fig.10 UAV takeoff and landing point real



图 11 通道巡检和精细巡检航迹规划

Fig.11 Path planning of the channel inspection and fine inspection

4.2 220kV 韶林线巡检概况

清远 220kV 韶林线全长 156.8 km，共 411 基铁塔。本次巡检飞行任务起点为 311 号塔，终点为 328 号塔，共计 18 基塔，巡检线路区段长约 6.27 km。

大型无人机巡检起飞及降落点，选址为清远市龙塘镇庙咀村某大院内，如图 10 所示，起飞点位于 318 号和 319 号塔附近，距离线路最近约 500 m。

巡检采用双侧巡检，从起降点飞至 319 号塔，沿大号侧方向飞行至 328 号塔，跨线后沿小号侧方向飞行至 311 号塔，再次跨线后沿大号侧方向飞行至 319 号塔，返回起降点降落。飞行计划及航迹规划情况如图 11 所示，通道巡检和精细巡检采用相似航迹。巡检场景如图 12 所示。



图 12 大型无人机跨山巡检

Fig.12 Large UAVs cross mountain patrol

4.3 巡检结果

1) 线路通道安全距离检查

通过通道巡检飞行，对巡检区段内线路下相导线对地、建筑物、树木及重要交叉跨越的距离进行了测定。

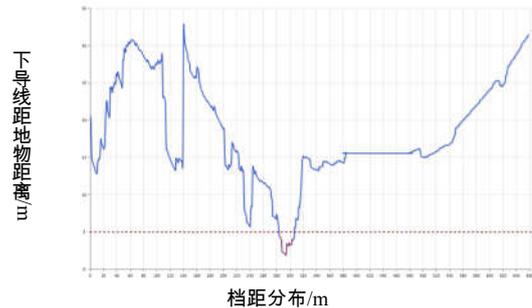


图 13 输电通道安全距离检测

Fig.13 Transmission channel safety distance detection

巡检发现 6 处导线与地物距离小于 5 m。通过人工确认，上述 6 处与导线距离过近的地物均为树木，距离测量准确。依据线路运行规程，220 kV 线路导线在最大弧垂、最大风偏时距离树木的安全距离不应小于 4.5 m 和 4 m，上述 6 处中有 3 处与树木最小距离小于 3 m，不符合要求；另外 3 处最小距离大于 4.5 m，符合要求，但需持续关注。314 号塔

至 314 号塔档距内 L1 相导线与地物的距离如图 13 所示。

2) 线路设备异常放电检查

通过精细巡检飞行，对巡检区段内的线路及杆塔设备进行紫外放电检查，未见明显放电现象，导线存在断股的可能性低。巡检时段为非积污期，绝缘子串脏污的可能性小。

3) 线路设备异常发热检查

通过精细巡检对线路金具、绝缘子及导线进行红外检查，发现部分玻璃绝缘子串高压端第一片绝缘子温度较同串其他绝缘子温度稍高约 1~3 °C。依据带电设备红外诊断规范(DL/T 664-2008)的规定，该类发热符合正常玻璃绝缘子电压致热型温度分布，绝缘子无明显异常；线路导线、金具无明显异常发热现象。巡检线路典型红外热图如图 14 所示。



图 14 巡检线路典型红外热图

Fig.14 Typical infrared thermography of inspection line

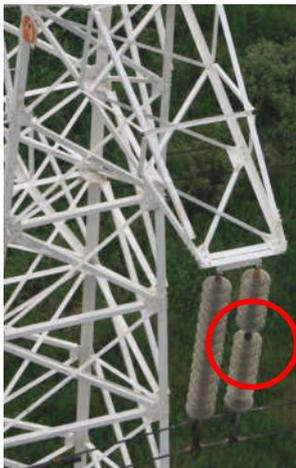


图 15 #319 塔玻璃绝缘子自爆

Fig. 15 Glass insulator defects of tower #319



(a)324 号塔 L3 相

(b) 327 号塔 L1 相

图 16 线路导线防振锤脱落

Fig.16 Wire anti-vibration hammer off

4) 线路通道及设备可见光检查

通过通道巡检发现线路通道部分杆塔基础附近区域有水土流失现象，但暂不影响线路安全运行。

通过精细巡检对巡检区段线路及杆塔设备进行可见光检查，检查是否有绝缘子破损、自爆、防振锤移位缺失、杆塔导线异物、金属部件锈蚀等异常。发现 319 号塔 L1 相大号侧玻璃绝缘子串有自爆现象，如图 15 所示；324 号塔 L3 相大号侧导线防振锤及 327 号塔 L1 相大号侧导线防振锤掉落，如图 16 所示；319 号塔 L1、L2 相横担有鸟巢但无散落至导线的可能性。

本次巡检结果经由人工复查以及与历史缺陷数据对比，完全得到验证，部分缺陷不能很好地由人工巡检观察判定，显示了无人机巡检的优越性。巡检表明，全自动巡检技术在 220 kV 线路巡检应用中达到了预期目标，具有较好的巡检效果。

4.4 南方电网规模化巡检应用

2014 年 1 月以来，利用研发的大型无人机多传感器全自动巡检系统完成南方电网下属佛山、清远、湛江、珠海、中山、惠州、广州等 7 个单位 24 条 110 kV-500 kV 线路、52 个架次的大型无人机巡检任务，累计巡检线路长度 230 km、巡检里程 680 km，共发现线路缺陷隐患 200 余项，其中紧急、重大缺陷 10 余项，表 1 将 220kV 八南线安全距离无人机与人工测量结果进行了对比。这是国内外首次利用大型无人直升机巡检系统、采用多传感器全自动巡检模式、规模化开展电网实际运行带电线路巡检应

用^[19-20]，积累了宝贵的巡检经验。

表 1 八南线无人机测距与人工复测结果对比

Tab.1 The UAV and the artificial ranging results of Ba Nan line

序号	位置	无人机测距/m	人工复测/m	障碍物
1	N40-41 档	2.22	2.85	树障
2	N41-42 档	3.99	3.80	低压线
3	N42-43 档	4.18	4.20	低压线
4	N43-44 档	3.90	4.40	低压线

5 结语

本文瞄准复杂环境下电力线路超低空、超视距、安全高效巡检需求，成功研发了大型无人直升机多传感器、全自动巡检技术，研制了成套巡检装备，在南方电网实现了规模化巡检应用，效果良好。

大型无人机全自动巡检包括无人机按飞行计划和航迹规划自动安全飞行，无人机任务设备按任务规划自动执行检测任务，对无人机巡检数据进行高效处理和智能诊断等。

大型无人直升机全自动巡检建立了一种高效、智能、全新的电力巡检模式，有助于提高智能电网电力线路巡检运维水平。

参考文献

- [1] 沈光隆, 赵新波. 直升机电力巡线技术[J]. 电力建设, 2008, 29(10):35-37.
SHEN Guanglong, ZHAO Xinbo. Helicopter power line inspection tour technology [J]. Electricity Power Construction, 2008, 29(10): 35-37.
- [2] 张文峰, 彭向阳, 钟清, 等. 基于遥感的电力线路安全巡检技术现状及展望[J]. 广东电力, 2014, 27(2): 1-6.
ZHANG Wenfeng, PENG Xiangyang, ZHONG Qing, et al. Status quo and expectation of safety inspection technology for electric power lines based on remote sensing[J]. Guangdong Electric Power, 2014, (2): 1-6.
- [3] 彭向阳, 刘正军, 麦晓明, 等. 无人机电力线路安全巡检系统及关键技术[J]. 遥感信息, 2015, (1): 51-57.
PENG Xiangyang, LIU Zhengjun, Mai Xiaoming, et al. A transmission line inspection system based on remote sensing: the system and its key technologies [J]. Remote Sensing Information, 2015, (1): 51-57.
- [4] WANG B, HAN L, ZHANG H, et al. A flying robotic system for power line corridor inspection [C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009: 2468-2473.
- [5] 成刚, 杨随虎. 无人机机载光电系统综述[J]. 应用光学, 2005, 26(4):1-4.
CHENG Gang, YANG Suihu. A summary of airborne photoelectronic systems on drones [J]. Applied Optics, 2005, 26(4):1-4.
- [6] 林韩, 林朝辉, 戴礼豪, 等. 无人直升机在福建电力输电线路巡视的初步应用[C]. 第十九届输配电研讨会论文集, 杭州, 2011:5.
- [7] 李力. 无人机输电线路巡线技术及其应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [8] 厉秉强, 王寿, 王滨海, 等. 利用无人直升机巡检输电线路[J]. 山东电力技术, 2010, (37)1:1-4.
LI Bingqiang, WANG Qian, WANG Binhai, et al. Applying unmanned autonomous helicopter to transmission line inspection [J]. Shandong Electric Power, 2010, (37) 1:1-4.
- [9] 林韩, 林朝辉, 汤明文, 等. 电力输电线路无人直升机巡视的应用[J]. 华东电力, 2011, (39)10:1657-1660.
LIN Han, LIN Chaohui, TANG Mingwen, et al. Application of unmanned helicopter patrol to power transmission line [J]. East China Electric Power, 2011, (39)10:1657-1660.
- [10] 王柯, 麦晓明, 许志海, 等. 无人机在湛江电网台风应急巡检中的应用[J]. 广东电力, 2015, (28)9:107-112, 118.
WANG Ke, MAI Xiaoming, XU Zhihai, et al. The application of UAVs in transmission line emergency inspections after the typhoon kalmaegi in Zhanjiang power grid [J]. Guangdong Electric Power, 2015, (28)9:107-112, 118.
- [11] 杨杰, 张凡. 高精度 GPS 差分定位技术比较研究[J]. 移动通信, 2014, (38)2:54-58, 64.
YANG Jie, ZHANG Fan. Comparison and research of high-precision GPS differential positioning technology [J]. Mobile Communications, 2014, (38)2:54-58, 64.
- [12] 麦晓明, 王锐, 陈海涵, 等. 输电线路无人机巡检数据链路通信系统设计[J]. 广东电力, 2014, (27)4:76-81.
MAI Xiaoming, WANG Rui, CHEN Haihan, et al. Design of UAV transmission line inspection data link communications system [J]. Guangdong Electric Power, 2014, (27)4:76-81.
- [13] 郑天茹, 王滨海, 刘俊, 等. 电力巡线无人直升机障碍规避系统[J]. 山东电力技术, 2012, (39)1:14-17.
ZHENG Tianru, WANG Binhai, LIU Liang, et al. Obstacle avoidance system of UAV power line-tracking system [J]. Shandong Electric Power, 2012, (39)1:14-17.
- [14] 徐华东. 无人机电力巡线智能避障方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [15] 麦晓明, 刘正军, 彭向阳, 等. 无人机电力线路安全巡检航线及任务规划软件系统设计[J]. 广东电力, 2013, (26)12:81-85.
MAI Xiaoming, LIU Zhengjun, PENG Xiangyang, et al. Design on safe inspection route and mission planning software system for unmanned aerial vehicle electric power circuit [J]. Guangdong Electric Power, 2013, (26)12:81-85.
- [16] 麦晓明, 朱庄生, 彭向阳, 等. 多传感器无人机电力线路巡检 POS 系统[J]. 中国惯性技术学报, 2015, (23)1:20-23, 28.
MAI Xiaoming, ZHU Zhuangsheng, PENG Xiangyang, et al. Position and orientation system for overhead power-line inspection using multi-sensor integrate unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, (23)1:20-23, 28.
- [17] 彭向阳, 陈驰, 徐晓刚, 等. 基于无人机激光扫描的输电通道安全距离诊断技术[J]. 电网技术, 2014, (38)11: 3254-3259.
PENG Xiangyang, CHEN Chi, XU Xiaogang, et al. Transmission corridor safety distance diagnosis based on point cloud and unmanned

- aerial vehicle loaded airborne laser scanning [J]. Power System Technology, 2014, (38)11: 3254-3259.
- [18] 彭向阳, 钟清, 饶章权, 等. 基于无人机紫外检测的输电线路电晕放电缺陷智能诊断技术[J]. 高电压技术, 2014, (41)8: 2292-2298.
- PENG Xiangyang, ZHONG Qing, RAO Zhangquan, et al. Intelligent diagnostic techniques of transmission lines corona discharge defect based on UAV ultraviolet detection [J]. High Voltage Engineering, 2014, (41)8: 2292-2298.
- [19] 陈晓兵, 马玉林, 徐祖舰. 无人飞机输电线路巡线技术探讨[J]. 南方电网技术, 2008, (2)6: 59-61.
- CHEN Xiaobing, MA Yulin, XU Zujian. Research on transmission lines cruising technology with the unmanned aerial vehicle [J]. Southern Power System Technology, 2008, (2)6:59-61.
- [20] 徐云鹏, 王红星, 莫兵兵, 等. 利用 Google Earth 软件制定直升机巡线方案[J]. 南方电网技术, 2011, (5)3: 84-86.
- XU Yunpeng, WANG Hongxing, MO Bingbing, et al. Scheme making of power line's helicopter inspection with Google Earth software [J]. Southern Power System Technology, 2011, (5)3: 84-86.
-

收稿日期：2015-12-20

作者简介：

彭向阳（1971），男，高级工程师（教授级），硕士，从事输电线路及高电压技术研究工作，pigpxy@126.com。

钱金菊（1990），女，助理工程师，硕士，主要研究方向为输电线路故障诊断及智能巡检技术。

麦晓明（1986），男，工程师，硕士，主要研究方向为输电线路故障诊断及智能巡检技术。