

[输电线路]

基于低空无人机遥感技术的超高压输电线路运维方法

文/贾明亮

国网山东省电力公司超高压公司

由于传统方法在超高压输电线路运维中应用效果不佳，不仅漏检率比较高，而且运维时间比较长，无法达到预期的运维效果，为此提出基于低空无人机遥感技术的超高压输电线路运维方法。实验证明，设计方法漏检率低于1%，对于4 000 m输电线路运维可以在10 min内完成，设计方法在超高压输电线路运维方面具有良好的应用前景。

输电线路是配电系统中重要组成部分，其运行状态直接关系到配电网运行安全性与稳定性，但是输电线路长期暴露在自然环境中，很容易发生氧化、风化，以及遭受雷击、鸟害等外界因素侵害，再加上输电线路在运行过程中承受机械载荷，尤其是超高压输电线路的电力负荷较高，输电线路发生老化，外部保护层逐渐失去保护功能，表面出现缺陷。如果不及时对线路缺陷进行识别及维护，很有可能发生各种故障，比如绝缘故障、放电故障、接地故障等，甚至造成安全事故，对配电系统的稳定性与安全性造成较大的威胁，同时也给电力企业带来极大的经济损失，因此目前大部分电力企业已经引进超高压输电线路运维技术。最初采取的运维方式为人工运维方式，由专业技术人员到现场进行测量，通过对数据分析识别出存在缺陷的线路，并对其进行维修。随着人工智能、无人机和遥感等现代化科学技术的不断发展，智能化运维方式逐渐取代人工运维方式。但是超高压输电线路电压等级比较高，线路结构比较复杂，因此超高压输电线路运维具有较高的难度，现行的运维方法在实际应用中效果并不理想，不仅漏检率比较低，而且整个运维周期比较长，传统方法已经无法满足实际需求，为此提出基于低空无人机遥感技术的超高压输电线路运

维方法。

基于低空无人机遥感技术的线路巡检

考虑到超高压输电线路数据采集具有一定的危险性，通过利用低空无人机遥感技术对超高压输电线路进行巡检，获取输电线路数据信息。无人机选用大疆经纬LJFA-4FA4无人机，无人机最大飞行高度为2 500 m，最大载重为1.26 kg，符合低空无人机遥感检测需求。根据超高压输电线路实际情况，结合运维区地形地貌以及植被覆盖情况，对遥感像控点进行布设，依据均匀布设原则，布设像控点数量在10~12个之间，如果巡检范围比较大，则可以将像控点数量增加到15~18个。布设完像控点后，设定无人机航线参数，其中包括无人机航行高度、基线长度，无人机航行高度要根据相机尺寸、焦距等确定，计算公式为

$$h = fGU/s \quad (1)$$

式中， h 为无人机航行高度； f 为图像传感器镜头焦距； G 为地面分辨率； U 为超高压输电线路距地面距离； s 为图像传感器尺寸。

为了保证拍摄输电线路遥感影像的清晰度，无人机最大航行高度不能超过超高压输电线路距地面距离的5.5倍，如果式（1）计算数值超过1.5 U ，则

无人机航行高度值按照1.5U设定,使无人机遥感扫描处于低空状态。无人机基线长度主要取决于遥感影像宽度以及遥感图像重叠度,计算公式为

$$k=(1-W)hLG \quad (2)$$

式中, k 为低空无人机遥感基线长度; W 为遥感图像重叠度; L 为遥感影像宽度。

根据输电线路走向,利用ArcGIS软件对无人机航线进行设计,由无人机搭载遥感图像传感器,按照规划航线对超高压输电线路进行遥感扫描,抓到线路遥感图像,并将采集到的遥感图像信息发送到计算机上,用于后续处理和分析。

灰度图像转化及亮度均衡化处理

由于无人机遥感图像采集过程中受到太阳照射条件影响,超高压输电线路与周围环境的可见光反射的亮度与波长存在差异,使得输电线路在拍摄出来的遥感图像中所显示的亮度区别不够明显,因此采用加权平均法对原始遥感图像进行灰度转化,生成输电线路灰度图像,用公式表示为

$$I(x,y)=n_R R(x,y)+n_S S(x,y)+n_P P(x,y) \quad (3)$$

式中, $I(x,y)$ 为转化后的输电线路灰度图像; $R(x,y)$ 为原始遥感图像的红色分量值; $S(x,y)$ 为原始遥感图像的蓝色分量值; $P(x,y)$ 为原始遥感图像黄色分量值; n_R 、 n_S 、 n_P 分别表示三个彩色分量对应的加权系数。

为了增强输电线路图像亮度,利用灰度腐蚀算法对转化后的灰度图像进行亮度均衡化处理,用公式表示为

$$F(x,y)=\min\{(f-M)I(x,y)A_M\} \quad (4)$$

式中, $F(x,y)$ 为亮度均衡化处理后的遥感图像; $f-M$ 为结构元素对遥感图像的灰度腐蚀; A_M 为灰度图像的结构元素。

线路缺陷识别及维护

为了精准识别到输电线路缺陷,在上述基础上利用阈值分割算法对预处理后的遥感图像进行分割,对遥感图像中前景与背景进行分析,前景为输电线路区域,图像分割的关键在于阈值的设定,将输电线路遥感图像的总灰度均值作为分割阈值,计算公式为

$$\sigma=\sum_{i=1}^N ip_i^{F(x,y)} \quad (5)$$

式中, σ 为输电线路遥感图像的总灰度均值; i 为输电线路遥感图像中任意一个像素点灰度值; $p_i^{F(x,y)}$ 为灰度值为 i 的像素在整个遥感图像中出现的概率^[10]。

将原始图像中所有像素点灰度值与 σ 比对,通常情况下图像的前景灰度值要高于图像背景灰度值,故将灰度值小于 σ 的像素点划分为图像背景,将灰度值大于 σ 的像素点划分为图像前景,以此提取到输电线路轮廓遥感图像。连通域可以反映出图像前景轮廓完成程度,因此将其作为输电线路缺陷识别特征向量,计算公式为

$$\varepsilon=E^{\sigma}/N\rho \quad (6)$$

式中, ε 为输电线路遥感图像中轮廓连通域; E^{σ} 为遥感图像前的边缘密度值; N 为输电线路遥感图像的平均像素值; ρ 为输电线路遥感图像宽度值。

利用上述公式计算出输电线路在图像中轮廓的连通域,在此设定一个阈值,如果式(6)计算结果大于阈值,则表示输电线路轮廓完整度较高,线路处于正常状态;如果式(6)计算结果小于阈值,则表示输电线路轮廓不够完整,线路存在缺陷,根据连通域低于阈值程度,确定线路缺陷等级,如果低于阈值30%,则当前输电线路存在较小的缺陷,在30天内对缺陷线路进行更换或者修复处理即可;如果低于阈值60%,则当前输电线路存在一般的缺陷,在7天内对缺陷线路进行更换或者修复处理即可;如果低于阈值80%,则当前输电线路存在较大的缺陷,需要在24 h内对缺陷线路进行更换或者修复处理。按照上述规则对缺陷线路进行维护,以此实现基于超高压输电线路的运维。

实验论证

1. 实验准备与设计

上文设计的基于低空无人机遥感技术的超高压输电线路运维方法在实际应用中效果并未得知,以下将采用对比实验的方式对设计方法的适用性与可靠性进行检验,以某超高压输电线路为实验对象,该输电线路电压等级为330 kV,属于直流输电线路,线路数量共10条,线路总长为2 564.14 km,线路采用IHFAH电缆,电缆工作电压范围为300~900 kV,芯数为5芯,线芯材质为裸铜线。利用本文设计方法对该超高压输电线路运维,为了使实验数据与实验结果具有一定的说明性,选

择两种传统方法作为比较对象，两种传统方法分别为基于机器视觉技术的运维方法和基于BP神经网络技术的运维方法，以下分别用传统方法1与传统方法2表示。根据该输电线路实际情况，无人机遥感仪器参数设定：无人机航行高度为124.45 m，基线长度为1 500 m，图像传感器镜头焦距为5.45 mm/24 mm，俯仰角为-75°~+45°，布设像控点数量为12个，实验共采集到10 000张遥感图像样本，按照上述流程对图像转化及亮度均衡化处理，识别线路缺陷，对缺陷线路采取相应的维护，随机选取了7条线路，具体结果见表1。

表1 超高压输电线路运维结果

线路编号	检测结果	维护对策
#01	存在缺陷	7天内线路更换
#02	正常	保持现状
#03	存在缺陷	7天内线路更换
#04	存在缺陷	24 h内线路更换
#05	正常	保持现状
#06	存在缺陷	30天内线路更换
#07	正常	保持现状

本文设计方法基本可以完成超高压输电线路运维任务，以下对具体运维效果进行评定。

2. 实验结果与讨论

实验以漏检率作为三种方法运维精度评价指标，漏检率可以反映出超高压输电线路缺陷检测的全面性，计算公式为

$$TU = \frac{BU}{BU + TF} \times 100\%$$
 (7)

式中，TU为漏检率；BU为未被检测到的线路缺陷数量；TF为正确检测到的线路缺陷数量。

实验以输电线路异常样本数量为变量，利用上述公式计算出三种方法漏检率，使用电子表格对实验数据进行记录，具体数据见表2。

表2 三种方法漏检率对比

异常样本数量/个	设计方法 (%)	传统方法1 (%)	传统方法2 (%)
1 000	0.23	3.15	2.31
2 000	0.35	4.05	3.02
3 000	0.41	5.14	4.25
4 000	0.56	5.24	5.36
5 000	0.69	6.35	6.14
6 000	0.71	7.25	7.15
7 000	0.76	8.26	8.25
8 000	0.84	9.34	9.14

从表2中数据可以看出，三种方法在漏检率方面表现出明显的差异，虽然三种方法漏检率均随着异常样本数量的增加而增加，但是设计方法在整个实验中漏检率增长幅度比较小，当输电线路异常样本数量达到8 000个时，设计方法漏检率仅为0.84%，可以将漏检率控制在1%以内，相比之下传统方法1漏检率是设计方法的10.25倍，传统方法2漏检率是设计方法的10.03倍，证明在超高压输电线路缺陷检测精度方面设计方法优于两种传统方法。为了进一步验证设计方法的可行性，对三种方法运维时间进行对比，运维时间是以获取到输电线路数据信息为开始时间，以缺陷输电线路完成维护时间为结束时间，将两个时间作差得到整个线路运维时间。实验以运维输电线路长度为变量，记录不同长度输电线路运维时间，根据记录数据绘制实验结果如图1所示。

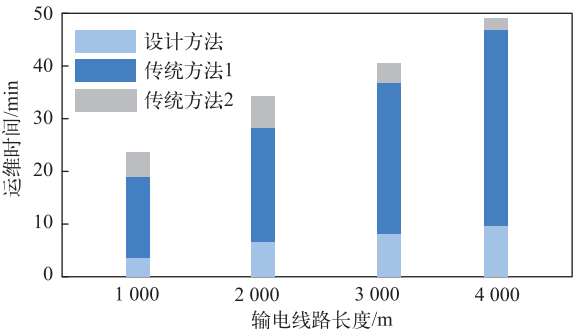


图1 三种方法运维时间对比图

从图1可以看出，三种方法在运维时间方面也表现出明显的差异，从总体上来看，无论是对多长输电线路进行运维，设计方法所使用的时间均短于两种传统方法，当运维输电线路长度为4 000 m时，设计方法仅用9.24 min，比传统方法1缩短将近35 min，比传统方法2缩短将近40 min。因此本次实验证明了无论是在漏检率方面还是在运维时间方面，设计方法均表现出明显的优势，相比较两种传统方法更适用于超高压输电线路运维。

结束语

智能化运维已经成为超高压输电线路检修工作中必不可少的一项技术，同时也是确保超高压输电线路安全、稳定和可靠运行的重要保障，结合低空无人机遥感技术优势，参考相关文献资料，针对传

(下转第87页)

可扩展性、可维护性、高效性、稳定性及可持续性等方面。它能够为火电厂提供更好的数字化解决方案,实现全链路的智能化监控和管理,同时增强了火电厂的可持续发展能力,提高了产业效益和社会效益。

结束语

云计算技术具有可扩展性强、可靠性高及成本低等优势,这些优势可以很好地解决火电厂分散控制系统存在的问题。因此,云计算技术在火电厂分散控制系统改造中的应用也越来越受到重视。本文首先探究了中心云技术和移动边缘云技术在火电厂分散控制系统升级改造中的优劣,发现对于火电厂这种对实时性要求较高的场景来说,移动边缘云相较于中心云会更具有优势,采用移动边缘计算可以大大提升数据处理的速度和效率,并且较好地解决了对网络带宽的依赖,降低了数据传输的延迟。基于此,针对火电厂分散控制系统的改造升级,本文提出了一种基于移动边缘计算的分散控制系统架

构,整个系统架构分为现场级,项目级和企业级三层,其可以实现对分散控制系统的即时响应、高效率的控制和管理。EA

(收稿日期:2023-06-12)

参考文献

- [1] 吴丹.基于云计算的DCS远程诊断与维护系统的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,
- [2] 陈文悦.智能发电运行控制中的系统可靠度测试研究[D].北京:华北电力大学北京,
- [3] 王开心.结构分散控制及其多时滞补偿研究[D].广州:广州大学,2018.
- [4] 林立群.电气自动化系统中分散控制系统的实施[J].科技传播,2013,5(8):146-149.
- [5] 王怀丰.分散控制系统在热电厂自动控制上的应用研究[J].才智,2012(20):40.
- [6] 唐标,李婷,李博,等.基于边缘计算的变电站内智能布控数据分析与展示[J].电气应用,2021,40(2):79-84.

(上接第58页)

统方法存在的不足与缺陷,将该项技术应用到超高压输电线路运维中,提出了一个全新的运维思路,有效提高了运维准确度和效率,同时提高了超高压输电线路运维工作的智能化、信息化水平,为基于低空无人机遥感技术的超高压输电线路运维方法研究提供了参考依据,也为实际运维工作提供了理论支撑,具有良好的现实意义。EA

(收稿日期:2023-06-15)

参考文献

- [1] 覃静婷,刘世男,张丽琼,等.无人机遥感影像提取的单木冠幅数据在桉树林分蓄积量估测中的应用[J].东北林业大学学报,2023,51(6):96-102.
- [2] 阮国恒.以状态评价为基础的输电线路运维检测自动管理平台设计[J].自动化技术与应用,2020,39(8):159-163.
- [3] 钟鑫,张加龙,黄云,等.无人机遥感技术在保护区管理工作中的应用——以老君山省级自然保护区为例[J].现代园艺,2023,46(6):

146-148.

- [4] 王晨曦,任家琪,叶造成,等.野外作业中自然地面控制点对无人机遥感影像精度纠正分析[J].防灾减灾学报,2023,39(1):75-79.
- [5] 荆文龙,周成虎,李勇,等.基于无人机智能基地的空地协同低空无人机遥感网构建及应用[J].遥感学报,2023,27(2):209-223.
- [6] 唐尚杰,刘美洁,黄钰辉,等.基于无人机遥感的天然次生林林窗格局与林下生物多样性关系[J].林业与环境科学,2023,39(1):30-40.
- [7] 袁海,李靖翔,赖皓.交直流换流站重要线路运维安全性评价技术研究[J].电工技术,2022(13):58-61.
- [8] 李浩强.关于配电线路运维检修技术存在的问题分析和解决对策探讨[J].石河子科技,2021(2):38-39.
- [9] 史浩鹏,马凡琳,杨轲.基于人工智能识别技术的运维检修监测系统设计[J].电气应用,2021,40(8):86-91.