

# 基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测研究

刘建蓝

福建永福电力设计股份有限公司, 福建 福州 350108

**摘要：**我国比较常见的电力设施巡检方式仍停留在人工爬塔巡检、仪器架设或肉眼观察等形式，整体劳动强度相对较高，巡视效率相对偏低；更重要的是，难以切实维护巡检人员的人身安全。随着电网系统的现代化、智能化发展，传统的巡检方法已难以满足行业要求，电力设施、高压输电线路巡检工作中引入智能技术已成为行业发展的必然趋势。文章将以电力系统中的杆塔倾斜巡检为重点，选择无人机遥感技术为主要手段，探究该技术在杆塔倾斜检测中的应用方式。

**关键词：**电力杆塔；倾斜检测；无人机遥感技术

## Research on Tilt Detection of Power Tower Based on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Technology

Liu Jianlan

Fujian Yongfu Power Design Co., Ltd. Fuzhou, Fujian 350108

**Abstract：** The common inspection methods for power facilities in China still remain in the form of manual tower climbing inspection, instrument installation, or visual observation. The overall labor intensity is relatively high, and the inspection efficiency is relatively low; More importantly, it is difficult to effectively maintain the personal safety of inspection personnel. With the modernization and intelligent development of the power grid system, traditional inspection methods are no longer able to meet industry requirements. The introduction of intelligent technology in the inspection of power facilities and high-voltage transmission lines has become an inevitable trend in industry development. The article will focus on tower tilt inspection in the power system, using unmanned aerial vehicle remote sensing technology as the main means to explore the application of this technology in tower tilt detection.

**Keywords：** power tower; tilt detection; unmanned aerial vehicle remote sensing technology

### 前言

电力行业与国民经济之间有着极为紧密的关联，两者相互依存。当前，我国电网系统规模在不断扩大，发展体系也日益成熟。作为电能输送中的核心载体，输电线路的运行稳定性至关重要。然而，随着我国用电普及范围的不断扩展，输电线路逐渐延伸至越来越恶劣的环境中，电力杆塔所处的条件也相对较严苛，加大了电力设施的巡视运维难度。结合无人机遥感技术发展趋势分析来看，将其作为飞行平台引入电力行业巡检工作也有较高的可行性。

### 一、基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测数据获取

#### (一) 架构系统框架

基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测系统中共包括四部分，分别为飞行平台、传感器数据采集系统、数传系统以及地面站系统。

首先，作为整个系统中的基本组成单元，飞行平台的运行状态会直接影响检测结果。为切实提升平台运行稳定性及检测精准性，检测人员可以优先选择多旋翼无人机设备。

其次，在传感器数据采集系统方面，整体架构可以参考图1。其中，惯性稳定云台中，需要加入减震器器件。通过这一方式，降低拍摄过程中动力系统造成的振动影响，提升拍摄质量，确保采集的数据精准有效。并且，在云台中，检测人员可以根据不同的检测对象，安装不同的采集设备，如相机、红外、紫外以及激光雷达

等<sup>[1]</sup>。为避免无人机遥感设备自身造成的数据影响，检测人员还可以在设备中安装自稳定控制系统；POS系统可以辅助检测人员实时了解测量的位置信息与姿态信息。借助云台控制器的存储与处理，明确电力杆塔的运动量误差，进而初步判断其倾斜状态。

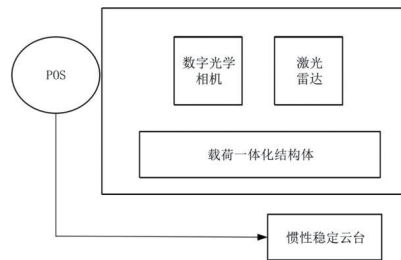


图1 传感器数据采集系统图

再者，在数传系统方面，主要包括三部分，分别为机载数据终端、中继设备以及地面数据终端。在电力杆塔倾斜检测工作

作者简介：刘建蓝（1984.10-），男，汉族，河南省濮川县人，高级工程师，大学本科，研究方向：遥感、测绘技术及在电力领域的应用。

中,检测人员可以通过这一系统,实现检测数据的实时传输,充分满足野外巡检工作要求。此外,在传输系统中,包含数字图传模块。检测人员可以利用其实时传输高分辨率的图像信息,稳定传输状态,提升传输速率。

最后,在地面数据处理方面,所建立的处理系统主要功能在于处理无人机遥感设备采集输送的各类电力杆塔数据,如图片信息、飞行姿态、激光点云等<sup>[2]</sup>。借助该系统,检测人员可以对电力杆塔的缺陷形成精准识别,及时察觉杆塔中存在的倾斜隐患,并精准界定其位置,及时进行运维处理,确保系统稳定运行。

## (二) 搭建遥感平台

基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测实践中,常用无人机飞行平台为小型多旋翼无人机飞行平台。其整体的系统建构可以参考图2。选择的无人机设备为大疆 M300RTK,无人机设备的基础参数可以参考下表。此外,具体操作中,检测人员还可以结合实际情况,酌情安装激光雷达测量系统,通过其与自稳云台的配合,充分满足巡检要求,提升巡检高效性<sup>[3]</sup>。

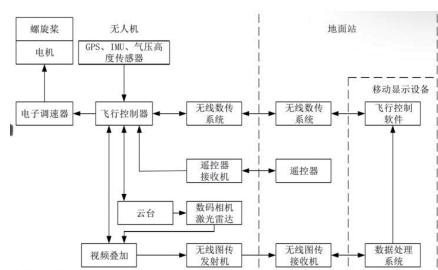


图2 无人机飞行平台系统架构

表1 大疆 M300RTK 无人机设备的基础参数

项目	指标
尺寸	810×670×430mm
重量	(三) kg
最大载重	2.7kg
悬停精度	垂直: ±0.1m; 水平: ±0.1m
RTK位置精度	垂直1.5cm+1ppm; 水平: 1cm+1ppm
障碍物感知范围	(一) -8m

## (三) 获取遥感数据

第一,明确任务与目标。正式利用无人机遥感技术进行塔杆倾斜数据检测任务前,检测人员需要生成清晰可行的工作计划,明确以下几点重要信息:检测区域内电力杆塔的输电线路走廊情况、航测规模、航测高度、作业日期、无人机设备的升起位置、降落位置。此外,在正式进行检测前,检测人员还需到达现场,对检测范围内的现场条件形成充分了解,明确划定起降场地。必要时,也需进行提前试飞,合理规划无人机设备的航迹,确保其飞行高度以及安全距离充足。

第二,布设像控点。为切实提高电力杆塔倾斜检测数据及三维模型的精准度,正式操控无人机设备前,需合理布设图面控制点。具体操作中,检测人员可根据现场情况,合理选择相控点的样式,如十字形、圆形或L型。不同像控点样式的像素有一定区别,以较为常见的L型为例,其长宽像素分别为15-20cm、3-4cm<sup>[4]</sup>。布设像控点时,检测人员需遵循均匀性原则。而后,需要在航测区域内,获取像控点的坐标数据。传统工作环境中,检测人员可使用全站仪设备,但该设备对于可见光及视线有较为严格的要求,也需要

检测人员多次移动,极容易累积误差。所以,在无人机遥感技术的配合下,检测人员可替换为RTK设备,切实提高测量的便捷性、高效性与直观性。测量期间,检测人员也要随时调整气泡,并保持仪器的铅直状态,进行多次测量,求取多结果中的平均值,控制测量误差。实验中,所布设的相控点共7个,其中有3个围墙顶面像控点及4个地面像控点,其坐标如表2所示。

表2 实验坐标数据

点号	X/m	Y/m	Z/m
RTK-01	***783.403	***3906.163	173.892
RTK-02	***843.334	***3899.742	173.938
RTK-03	***950.852	***3889.379	174.255
RTK-04	***847.507	***3972.765	172.402
RTK-05	***926.148	***3924.823	173.043
RTK-06	***874.786	***4009.601	171.927
RTK-07	***963.150	***3972.884	172.918

第三,设计航线并进行飞行作业。进行无人机航飞之前,检测人员需进一步了解任务要求及技术规范,能够合理设定飞行的具体参数,确保获取的影像数据精准、可靠。在电力杆塔倾斜度检测工作中,检测人员可以以倾斜摄影测量航线设计为主,着重关注航高、影像重叠度、航线参数的设计<sup>[5]</sup>。完成基础准备工作后,需按照特定要求,选择天气较好的时间进行操作,全面开展数据采集,具体流程如下。首先,检测人员需提前到达航测区域,组装自稳定云台、飞行平台、激光雷达扫描仪及倾斜摄影相机;同时,需对无人机设备的质量、电池电量进行检测,着重检查桨叶安装情况,并进行简单试飞;然后,在飞行平台导航控制系统中,输入提前设置好的无人机航迹参数,明确航高与航线。最后,以手动操作的方式,运行无人机系统,并于地面控制系统发送各类命令,按照既定流程,利用无人机采集传输相关数据。

第四,数据检查。在利用无人机遥感技术检测电力杆塔的倾斜情况时,所采集的数据通常会受到外界客观因素的影响,如风力因素、温差因素、环境因素。所以,初步完成数据采集工作后,检测人员需对影像数据进行检查,判断影像质量是否能够满足检测工作要求。一般情况下,在影像检查中,检测人员需关注以下几大标准。第一,图像是否清晰;第二,图像中的光线是否充足;第三,图像中是否存在反光问题或阴影问题。在确保图像不存在以上几类问题的情况下,将其导入到检测系统,用于后续的倾斜度检测参考。

第五,数据获取。确保采集数据、信息准确且具备参考价值的前提下,将其存储于检测系统中。此外,检测人员需要着重关注航测数据。在明确采集范围、采集航线的基础上,合理操控无人机设备,确保激光雷达不会出现漏扫问题。为保证倾斜影像数据质量,检测人员还需要设定多个检测方向,以“井”字航线操控无人机,在航线不变的状态下进行多次航飞,最终结合对比数据建立三维模型,并对倾斜度进行对比分析。

## 二、基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测实践分析

### (一) 电力杆塔倾斜检测原理

在电力系统巡检方面,电力杆塔的倾斜可以被理解为杆塔中

心偏离铅锤位置的现象。其倾斜度的计算方式如下：

$$q = \frac{S}{H} \times 100\%$$

其中，q代指电力杆塔的倾斜程度；S代指杆塔的倾斜值；H代指巡检过程中杆塔测量点距离地面的高度。

客观来看，在当前的杆塔倾斜检测工作中，我国并未建立统一、明确的规定要求，不同地区、不同高度的电力杆塔倾斜度要求并不相同。如钢筋混凝土类的杆塔最大允许倾斜度为1.5%；钢管材料杆塔的最大允许倾斜度为0.5%<sup>[6]</sup>。具体检测工作中，检测人员需要根据实际情况合理划分检测标准。

传统检测工作中，检测人员可以应用的主要技术设备为全站仪。具体操作流程如下：首先，找准杆塔中心，在距其塔高1.5倍的位置上架设全站仪设备。完成设备的安装以及调平操作后，转动设备镜筒，分别从顺线路位置与横线路位置进行检测。

### （二）电力杆塔倾斜检测流程

利用无人机遥感技术检测电力杆塔倾斜情况的过程中，检测人员需要选择正确的检测方法，并架构完善的检测流程。

正式进行测量工作前，检测人员需要明确杆塔的结构框架，将其设定为完整的刚性体。在此基础上，转化杆塔倾斜度，将其理解为顶面对角线与底面对角线交点处形成的空间投影偏离值与中心点高度之间的比值。而后，需要利用无人机遥感技术确定关键参数，如底面中心点、位移中心点、顶面中心点、杆塔测量高度等<sup>[7]</sup>。基于关键参数的整合与计算，对电力杆塔的倾斜情况形成直接展示。

具体来看，在利用无人机遥感技术进行倾斜检测时，可以参考如下流程。

第一，需要建立绝对水平面。基于无人机遥感技术的辅助，建立虚拟化实景模型。并从这一模型依托中，明确较高塔身的坐标。完成这一操作后，从中选择高程数值的最小值，并建立绝对水平面；明确塔脚坐标，并从中选择高程数值的最大值，建立绝对水平面。

第二，需要求取空间直线方程。假设经过无人机遥感技术测量后，选择的塔身坐标以及塔脚坐标分别为 $o(x_o, y_o, z_o)$ 以及 $O(X_o, Y_o, Z_o)$ ，那么检测人员需要建立的空间直线方程如下：

$$\frac{X-x_o}{X_o-x_o} = \frac{Y-y_o}{Y_o-y_o} = \frac{Z-z_o}{Z_o-z_o}$$

第三，需要对塔脚的坐标进行修正。完成空间直线方程的建立与计算后，检测人员需要对其他三条棱的方程进行推导计算，并关联于绝对水平面方程，以此明确其他塔脚点的修正值，提升检测结果精准性。

第四，需要对上下位置的绝对水平面中心点进行检测。在利用无人机遥感技术完成基础检测工作后，检测人员需要依次连接经过修正后的各个顶点坐标，建立完整的四棱台顶面结构。在此基础上，明确顶部与底部的中心点位置。

需要对塔杆的倾斜值与高度进行计算。在明确顶部与底部的中心点位置后，检测人员可以将得到的数据、坐标参数代入到公式 $\frac{X-x_o}{X_o-x_o} = \frac{Y-y_o}{Y_o-y_o} = \frac{Z-z_o}{Z_o-z_o}$ 中，通过这一方式重新推导出新的空间直线方程，对电力杆塔的法向量以及夹角度数进行计算，最

终生成明确倾斜度结果<sup>[8]</sup>。

### （三）电力杆塔倾斜检测结果

在利用无人机遥感技术测量电力杆塔的倾斜度过程中，检测人员需同步使用激光雷达技术与无人机倾斜摄影技术，在技术的辅助下明确模型坐标，而后逐步推进倾斜度的计算工作。在此期间，检测人员也可合理导入智能化软件Acute3D Viewer，利用该软件提取实景三维模型中的坐标点，并自动化生成明确坐标数据。为便于后续倾斜度的计算与测量，检测工作中检测人员还可以以2000国家大地坐标系CGCS2000为塔干坐标点的提取基础<sup>[9]</sup>。

完成这一操作后，检测人员需要合理规划无人机遥感设备的航线，并合理设定架次。完成无人机遥感设备操控任务后，将采集到的信息进行预处理，并通过导入参数的方式建立三维模型，从中提取坐标。在此过程中，检测人员需要重点关注的内容为，尽量提升高程数值的相近性，从而控制倾斜度的测量与计算误差。最后，检测人员可以将各个架次获得的坐标信息进行整理归纳，结合前文所建立的流程体系进行进一步的推导分析，输出的数值便是整个塔杆不同架次的倾斜度。

对比传统工作环境中常用的全站仪检测技术分析来看，无人机遥感技术辅助下形成的检测结果最大误差更低，前者误差处在0.16%范围内，后者误差则可以控制在0.06%左右<sup>[10]</sup>。由此可见，在电力杆塔倾斜检测中，无人机遥感技术具备较高的应用价值与应用可行性，可以减少单次测量、传统测量形成的偶然误差，大大提升检测效率。

## 三、结论

综上所述，作为一种安全效益、经济效益相对较高的方式，利用无人机遥感技术进行电力杆塔倾斜检测，逐渐发展成为电力行业技术人员需重点关注及掌握的一项技术手段。结合文本分析来看，运用技术推进倾斜检测工作时，需选择合适的电力杆塔三维模型建构技术、获取丰富检测数据。此外，需深入把握以无人机遥感技术为依托的电力杆塔倾斜检测原理，建立完善模型、合理流程，精准界定检测算法，并充分运用检测结果，以实现电力巡检工作的现代化发展。

### 参考文献

- [1] 韩冰, 尚方. 面向无人机输电线路巡检的电力杆塔检测框架模型[J]. 浙江电力, 2022, 35 (04): 6-11.
- [2] 王榆夫, 韩军, 赵庆喜, 等. 基于无人机图像的电力杆塔倾斜检测[J]. 计算机仿真, 2022, 34 (07): 426-431.
- [3] 江亮, 郑恩辉, 童景哲. 基于电力杆塔巡检的无人机重定位拍照系统设计[J]. 科技通报, 2020, 36 (10): 33-35.
- [4] 芦竹茂, 龚浩, 金秋衡, 等. 无人机激光雷达点云电力杆塔倾斜状态测量[J]. 应用科学学报, 2022, 40 (03): 389-399.
- [5] 徐思. 基于北斗的电力杆塔倾斜度监测装置的研制[D]. 合肥工业大学, 2021.
- [6] 姚煜. 基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测[D]. 东北农业大学, 2021.
- [7] 徐全. 基于无人机巡检的电力杆塔识别与测量[D]. 中国矿业大学, 2023.
- [8] 林琦. 基于无人机激光点云的电力杆塔倾斜检测算法研究[D]. 广西大学, 2023.
- [9] 李法斌. 基于机载可见光与激光雷达技术的电力杆塔倾斜测量[D]. 东北农业大学, 2022.
- [10] 胡霞, 仲林林. 基于改进R3det的无人机电力杆塔倾斜程度检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (10): 189-200.