

无人机巡检在矿区铁塔检测中的应用

张凯¹, 王海滨², 钱茂冬², 肖素枝²

¹国能亿利能源有限责任公司黄玉川煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯

²星逻智能科技(苏州)有限公司, 江苏 苏州

收稿日期: 2024年7月25日; 录用日期: 2024年8月26日; 发布日期: 2024年10月14日

摘要

矿山资源开采易破坏采空区上覆岩层的原始应力平衡状态, 最终造成地质沉降、地表变形, 甚至塌陷事故, 采空区上架设的输电线路杆塔由于地质变化容易产生倾斜偏移等现象。通过对矿区铁塔的防倾覆检测, 可以有效判断矿区地质沉降、塌陷、开裂等问题, 高效地检测杆塔倾斜度用于排查矿区地质隐患, 对于防治矿区周边环境问题意义重大。目前, 传统的人工巡视方法存在局限性较高、人力成本高等问题。近年来, 无人机技术在电力行业中逐渐普及, 并以其作为飞行平台进行输电线路巡检已成为新趋势。通过无人机的自主化巡检, 实时动态载波相位差分技术实现对矿区铁塔的快速、精确的巡视, 对于高效探测、预警、防治矿区周边地质问题具有重大意义。

关键词

铁塔倾斜, 无人机巡检, 图像识别定位, 地质沉降

Application of UAV Inspection in Inspection of Iron Tower in Mining Area

Kai Zhang¹, Haibin Wang², Maodong Qian², Suzhi Xiao²

¹Huangyuchuan Coal Mine of National Energy Yili Energy Co., LTD, Ordos Inner Mongolia

²Star Intelligent Technology (Suzhou) Co., LTD, Suzhou Jiangsu

Received: Jul. 25th, 2024; accepted: Aug. 26th, 2024; published: Oct. 14th, 2024

Abstract

It is easy to destroy the original stress balance state of overlying strata in the goaf during mining resources exploitation, resulting in geological subsidence, surface deformation and even collapse accidents. The transmission line tower erected in the goaf is prone to inclined deviation due to geological changes. Through the anti-overturning detection of the iron tower in the mining area, it can effectively

judge the geological settlement, collapse, cracking and other problems in the mining area, and efficiently detect the slope of the tower for the investigation of geological hidden dangers in the mining area, which is of great significance for the prevention and control of environmental problems around the mining area. At present, the traditional manual inspection method has some problems, such as high limitation and high cost. In recent years, UAV technology has been gradually popularized in the power industry, and it has become a new trend to use it as a flying platform for transmission line inspection. Through autonomous inspection of UAV, real-time dynamic carrier phase difference technology can realize fast and accurate inspection of iron tower in mining area, which is of great significance for efficient detection, early warning and prevention of geological problems around mining area.

Keywords

Tower Tilting, UAV Inspection, Image Identification Location, Geological Settlement

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业水平和社会发展水平的提高, 矿区资源开发利用程度得到大幅度提升。然而, 在资源开采方面, 过度挖掘导致采空区扩大, 可能引起地质沉降, 造成矿区周边严重的地质灾害以及环境破坏问题。在采空区上架设输电线路易受到塌陷威胁, 产生偏移倾覆等现象。矿区铁塔是支撑高压输电线路的关键设施。由于采空区塌陷现象越来越普遍, 矿区铁塔容易受到威胁。当出现塌陷时, 输电杆塔可能会出现位移、构建变形或撕裂等情况[1]。这些因素不仅对电网安全运行造成很大影响, 同时反映了矿区周边存在的严重地质问题。因此, 杆塔防倾覆检测不仅仅给矿区电力资源利用以及人民财产安全带来保障[2], 同时也为矿区周边地质塌陷开裂沉降等环境问题的探测、预警和防治具有重大意义。

目前, 矿区铁塔的防倾覆检测主要依靠传统的人工巡视方法。然而, 这种方法存在局限性较高、人力成本高等问题。需要雇佣专门的巡检人员进行定期巡视, 增加了企业运营成本。同时, 由于人为因素可能导致漏检或误判情况发生, 并且效率相对较低。对于大型矿区而言, 需要耗费较长时间才能完成全面的巡检任务。此外, 在进行铁塔巡查时攀爬高空设备、穿越危险地带等操作都有潜在伤害风险, 矿区电力杆塔所处地理环境恶劣, 巡查难度大, 安全风险系数也很高, 传统手动记录方式容易出现数据丢失或错误, 并且需要花费额外时间和精力来整理和归档数据。

为了避免以上问题并及时识别杆塔实时状态, 我们需要一种可靠稳定并具有先进性监测系统来预警风险事件并帮助相关部门进行风控管理以确保整个供应链环节安全稳定运行。

近年来, 随着无人机技术的不断发展, 在我国电力行业中, 以其作为飞行平台进行输电线路巡检已成为新趋势。在电力巡检领域, 无人机巡检逐渐普及, 并得到多个电力部门深入研究和应用。相比传统的人工巡检方式, 使用无人机可以显著提高效率、精度和安全性, 并且数据共享更加便捷。然而, 在当前的矿区铁塔检测领域中, 无人机方案并未广泛应用。当矿区开采量达到一定规模时, 由于采空区过大可能会对地表地形产生影响; 同时地下环境变化也会影响矿区铁塔位置偏移和变形。因此通过利用无人机快速监测矿区铁塔倾斜及偏移情况, 可将全自动化巡检成为现实[3]。这样能够更好地保证整个供应链环节安全稳定运行, 有效避免潜在的地质等环境问题。

如何能够高效率、高准确性地对矿区的铁塔进行快速的检测成为了我们此项研究的关键。本文将阐

述如何通过无人机来完成对矿区铁塔的倾斜及偏移的快速检测, 通过无人机的自主化巡检, 和实时动态载波相位差分技术来达到对矿区铁塔的快速、精确的巡视。基于高精度吊舱获得铁塔数据, 最后基于图像的智能分析获取最终的检测结果, 为电力杆塔倾斜缺陷的巡查提供了数据来源与技术支持, 对提升一线巡查人员工作安全性具有重要实践意义, 并且降低风险的同时提升了巡检效率。

2. 技术分析

2.1. 无人机巡飞技术

基于无人机飞行控制系统的安全稳定, 随着 RTK 厘米级定位技术的广泛应用, 无人机实现自主化飞行, 无人机根据智能规划的航线进行自主飞行, 从起飞、任务执行、任务执行完毕自主降落实现纯自动化, 完全脱离对人的依赖, 实现无人机真正无人化运作, 无人机通过内部的传感设备, 将对自身的实时状态进行感知, 并将实时状态传至飞行控制系统, 对当前的飞行姿态介入纠正, 从而得到无人机稳定飞行的状态。当无人机处于 RTK 定位的状态时, 无人机的定位精度小于 ± 0.1 m。

1. 无人机控制技术

将飞行控制技术应用于无人机, 多轴无人机的飞行、悬停, 姿态变化等均由多种传感器将无人机本身的姿态数据传回飞控, 再由飞行控制系统通过运算和判断发出指令, 执行器接收指令后完成动作或飞行姿势的调整。此飞行控制系统可以理解成无人机的中央处理器(CPU), 其主要功能是发送各种命令并处理返回的各块光伏组件数据。飞行控制系统最基本的功能是控制飞机在空中飞行时平衡, 这种平衡由惯性测量单元(IMU)测量, IMU 通过感知飞机当前的倾斜度数据, 由编译器编译成电子信号, 然后将该信号传输给飞行控制系统的单片机。单片机飞机当前数据, 计算出补偿方向、补偿角, 并将这些补偿数据编译成电子信号, 发送到被管理的舵机或电机, 舵机或电机执行命令完成补偿工作, 在传感器感知到飞机稳定后, 将实时数据发送给单片机, 单片机就会停止补偿信号, 从而形成一个循环。

2. 航迹规划技术

航迹规划是寻找从起点到终点的最优路径, 它需要数字地图、无人机特性参数和任务需求等信息。无人机航迹规划系统是飞行器任务规划系统中重要的组成部分, 其功能包括选择具有最低损耗通过的路径以及根据现场情况进行在线航迹调整并引导着飞行器完成飞行任务。为了解决这个问题, 使用不同算法如 A*算法、Dijkstra 算法和 RRT 算法等来寻找一条最优路径, 并且适用于不同场景下的航迹规划问题。在实际应用中还需要考虑在线计算与离线计算两种方式以及仿真或实验测试两种验证方法[4]。

轨迹设计问题主要研究无人机在动态场景下位置调整, 在智能电网中得到广泛应用作为电力巡检等飞行任务技术支持。目前, 用于无人机轨迹设计的方法通常可以分为数值优化方法和启发式方法两种, 并且已经得到比较成熟的应用, 在不同场景下有着各自适合的使用条件。

3. 无人机导航定位技术

微处理器技术和 MEMS 技术的进步为低成本高精度的定位导航提供了发展基础。微处理器快速发展使得人们可以在低价格平台上进行更大量的运算, 而 MEMS 惯性器件则降低了惯性器件体积、重量和成本, 但其精准程度也相应下降。因此通过其他方式进行辅助组合导航可以弥补其精度不足。目前有多种反射测距原理用于实现厘米级定位精度, 如超声波、激光、超宽带和差分 GPS 等方法。虽然这些方法具有远距离和高精度优点, 但易受到干扰影响; 例如超声波容易受环境影响且有效距离短; RTK 技术是一种相对理想的方案用于无人机等设备中实时动态定位, 并能够达到低成本高精度要求[5]。

2.2. 基于图像识别的目标定位技术

基于图像的相机定位指在某个世界坐标系下, 根据相机捕获的图像或视频来计算相机的位姿。如图

1 所示, 前端对相机捕获的图像进行实时处理, 并利用后端提供的地图点数据实时估计相机的位姿。根据环境是否已知, 可以将该技术分为两个类别: 环境已知型和环境未知型。在环境已知型的定位方法中, 根据至少需要观测到的特征点数量, 可以分为 $3 \leq n < 6$ 的方法和 $n \geq 6$ 的方法。其中, n 为所使用的特征点数量。这些方法研究的是 PnP (Perspective-n-Point) 问题。一般来说, $3 \leq n < 6$ 的问题是非线性的, $n \geq 6$ 的问题是线性的。

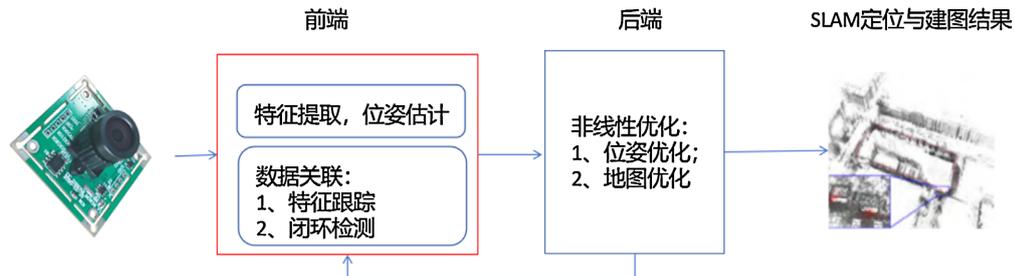


Figure 1. Image-based camera positioning
图 1. 基于图像的相机定位

1. 目标检测技术

“目标检测”是机器视觉领域中的一个重要问题, 其需要对图像进行分析以寻找特定类别目标的位置。不同物体之间具有不同的形状、纹理和颜色等特征, 而即使是相同种类的物体也可能在大小、形状、颜色和纹理方面存在差异, 这使得目标检测成为一个非常具有挑战性的任务[6]。可变形部件模型(DPMI21)首先提取了与方向梯度直方图类似的特征, 并且建立了根模型和部件模型来描述目标样本。使用原始图像匹配根模型获得响应图, 使用 2 倍上采样后的图像匹配部件模型并下采样到与根响应加权输出相应图。如果想要实现多尺度检测, 则需要建立多个不同尺度下的目标模型。当前卷积神经网络(CNN)基础上发展出来的基于深度学习算法实现最优异成绩, 在机器视觉领域中被广泛关注。卷积神经网络(CNN)是一种具有局部连接、权值共享等特点的深层前馈神经网络(Feedforward Neural Networks), 是深度学习(deep learning)的代表算法之一, 擅长处理图像特别是图像识别等相关机器学习问题, 比如图像分类、目标检测、图像分割等各种视觉任务中都有显著的提升效果, 是目前应用最广泛的模型之一。

2. 信息采集技术

信息采集技术通过无人机构建更高质量通信信道明显减少功率损耗和通信时延, 相比传统地面通信系统更具优势。由于无人机续航能力受限, 如何减少能量消耗已成为系统设计过程中必须考虑因素之一。越来越多研究关注无人机在无线传感器网络中信息收集及其传播问题。

3. 现实应用

3.1. 前期数据的采集

在电力杆塔无人机自主巡检中, 前期数据采集包括铁塔基本信息的获取, 如铁塔坐标、海拔高度、四个触点坐标以及所立地面的海拔高度等。此外, 借助无人机的倾斜摄影技术可以对区域进行建模, 并实现精细化数据采集。具体流程为: 首先将杆塔 GPS 坐标输入导航系统, 在自主导航下对电力走廊进行扫描和拍摄, 并通过搭载的无线数据传输系统将采集到的影像信息、定位信息和飞行状态等传输至地面站进行保存和处理; 其次, 融合倾斜影像和激光点云数据构建三维模型; 最后提取杆塔三维模型坐标并计算其倾斜度判断是否在允许范围内, 并形成最终成果存档。整个过程涵盖了飞行平台、多传感器数据采集系统、无线数传系统以及地面站系统等组件。

1. 无人机飞行平台

无人机的飞行动力系统和飞行控制系统是构成其最基本单元的组成部分。为了实现高精度数据采集、高效率数据传输和自动化巡检能力，需要在该平台上安装高精度传感器系统、自稳定云台控制系统、定位姿态系统(POS)以及避障等其他设备。本文中选用多旋翼无人机进行数据获取，其中飞行动力系统主要由碳纤维机体、螺旋桨、电调电机以及电池组成。

同时，飞行控制系统也被划分为地面控制平台和机载飞航计算机两大部分。地面控制平台包括遥控器、飞航软件 and 数据处理系统等；而机载则由自动驾驶计算机，传感器以及执行部件组成。当无人驾驶对输电线路走廊进行遥感测量时，传感器会收集并测量其姿态信息，并将此信息发送至飞航计算机。同时通过无线通信技术也可以接收到来自地面站点发出的指令信号，在经过计算转换之后输出至电调或者电动模块中从而完成无人驾驶导航与数据采集任务。

2. 多传感器数据采集系统

数据采集传感器的整体结构主要由数据采集传感器、自稳定云台和 POS 系统等部分组成。为了降低无人机动力系统带来的震动干扰，自稳定云台一般都配备三轴减震装置，并且可以安装不同类型的数据采集设备(如相机、激光雷达、红外线或紫外线)，以实现对应种类的数据采集任务。此外，该云台内置有自稳定控制系统，可避免因无人驾驶飞行或者外界环境影响而引起的误差。POS 系统能够将实时位置和姿态信息传输到机载平台上，在经过处理后返回至云台控制器。惯性自稳定云台根据接收到的姿态信息隔离各种外界干扰，并获取运动误差量提供飞行过程中所需补偿参数。

3. 数据通讯链路系统

数据通信系统是由机载数据终端、地面数据终端和中继设备等组成的，其主要应用于无人机飞行平台与地面站之间的实时数据传输。在野外电力设施巡检等需要困难条件下的通信场景中，该系统尤其需要具备高度可靠性和抗干扰能力。数字图传系统以较高的成本为代价，提供了较好的传输速度和质量，并适用于高分辨率图像数据的实时传输；而模拟图传系统则具有低廉的成本，但有效传输距离仅约 100 m 且抗干扰能力差，因此更适合短距离标清影像数据的传输。因此，在选择合适的数据传输系统时应根据实际项目需求进行评估和选择。

4. 地面数据处理系统

地面站数据处理系统主要用于处理无人机遥感采集的各种图片影像、飞行姿态、激光点云等数据，是后期数据处理分析及应用系统。系统通过缺陷识别检测技术，结合电力杆塔的特点，针对杆塔的倾斜隐患进行故障分析，确定杆塔的故障位置，保证电力系统的稳定运行。

3.2. 电力杆塔倾斜检测

本文介绍了对铁塔进行不同角度的数据采集方法，包括侧面四个方向和俯视图。通过建立塔尖到底座之间的三角关系，可以得出计算数据来确定铁塔的倾斜量，并将其映射到地下环境中。需要注意的是，在矿区输电线路杆塔基础设在软土地区、山地、悬崖戈壁或降水量大区域时，可能会产生不均匀沉降、滑移和结构破损等现象，导致杆塔倾斜度超过规范要求；同时，温度差异和自然环境变化等原因也可能导致杆塔两侧导线受力平衡状态被破坏而发生倾斜和形变，如表 1 所示。一旦出现杆塔倾斜情况，则会造成电气安全距离缩小以及甚至导致输电线路失稳并严重损害其运行安全性。

1. 杆塔倾斜检测原理

本章设计了一种基于无人遥感三维建模技术的杆塔倾斜度测量方法，并进行了输电线路铁塔的倾斜度实测，弥补了传统杆塔倾斜检测方法作业效率低、受地形限制等不足，如图 2 所示。

杆塔倾斜一般指由于基础立柱顶面高差导致的杆塔中心偏离铅垂位置的现象，如图 1 所示，对应杆

塔倾斜度的计算公式为：

Table 1. Maximum allowable inclination of power tower

表 1. 电力杆塔倾斜度允许最大值

| 类别 | 钢筋混凝土杆 | 钢管杆 | 铁塔 |
|-----------|--------|------|--------------------------------------|
| 杆塔允许最大倾斜度 | 1.5% | 0.5% | 0.5 (50 m 及以上高度) 1.0% (50 m 以下高度) |

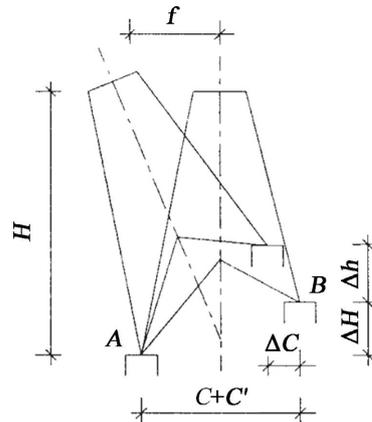


Figure 2. Schematic diagram of tower tilt detection

图 2. 杆塔倾斜检测原理图

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

式中 q 为倾斜度； f 为倾斜值，单位 mm； H 为杆塔顶面或测量点至地面的高度，单位 mm，杆塔倾斜度的计算是 f 与 H 之比的百分数。由《DLT 741-2019 架空输电线路运行规程》可知不同高度的运行中杆塔最大允许倾斜度不同，见表 1。

2. 杆塔三维模型概况

输电线路杆塔按形状一般分为：上字型、干字型、门字型、V 字型、工字型、酒杯型和猫头型等，按用途可分为：耐张塔、直线塔、转角塔、换位塔、终端塔和跨越塔等，一般来说，除门字型、V 字型和异型铁塔，杆塔结构主要由塔头、塔身和塔腿三大部分组成，如图 3 所示。

塔头：从塔腿往上，杆塔结构的横截面急剧变小，截面变小处以上部分。

塔腿：基础上面的第一段塔架称为塔腿。

塔身：塔腿和塔头之间的部分称为塔身。

3. 测量流程及算法实现

本文建立杆塔几何模型测量的方法中，将杆塔理想的视为一个刚性整体，杆塔倾斜度可转化为顶面对角线交点与底面对角线交点的空间投影偏离值 S 与两个中心点空间高度 H 的比值[7]，如图 4 所示。可以利用构建的杆塔三维模型获取到底面中心点 p 和位移后的中心点 p' 、顶面中心点 p 和位移后的中心点 p' ，则 p' 的投影与 p 的投影在垂直方向上的距离为杆塔测量高度 H 在水平方向上的距离为杆塔倾斜值 S ，即可实现电力杆塔的倾斜度测量。如图 3 所示为杆塔顶面中心点 p' 位移的示意图，同理可求得杆塔底面中心点的位移情况。利用上文所构建的杆塔实景三维模型，获取接近塔脚的 4 个点的坐标以及接近塔头的 4 个点的坐标。在塔头选择高程数值最小的坐标点，使用此点的高程，在空间中建立一个水平面，

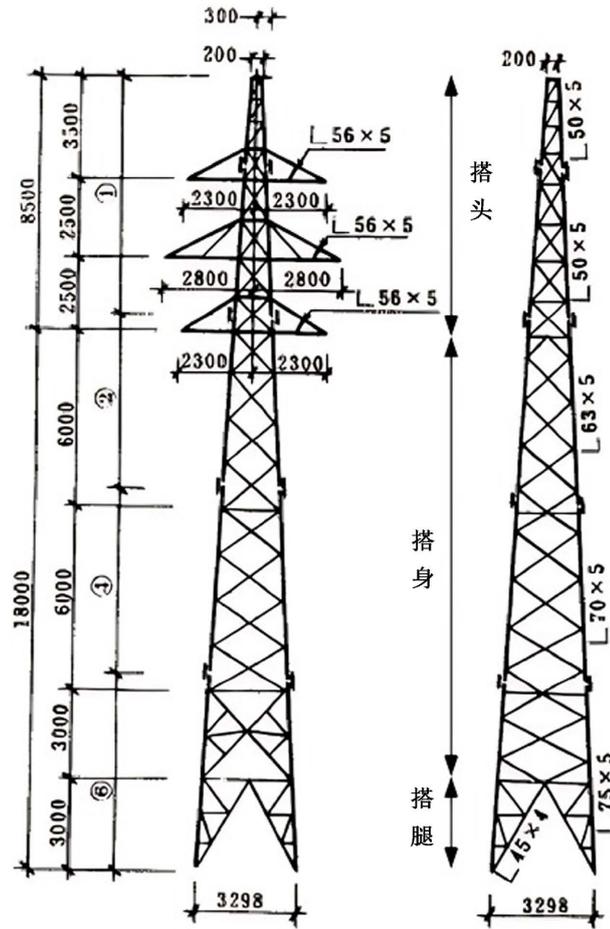


Figure 3. Schematic diagram of the tower
图 3. 杆塔示意图

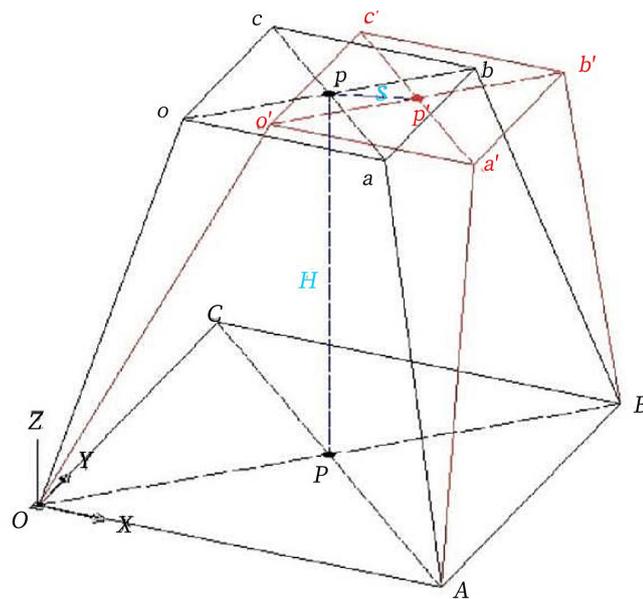


Figure 4. Tower tilt measurement schematic diagram
图 4. 杆塔倾斜测量示意图

水平面与其他 4 个钢结构外边缘线形成了 4 个交点，此 4 个点在同一水平面上，连接 2 条对角线，交点就是杆塔顶部中心点，如图三中的 p' 点；同理可得到杆塔模型底面的中心点。基于三维模型重建杆塔倾斜度测量步骤如下。

(1) 建立绝对水平面

从实景模型中获取到的较高塔身的 4 个坐标分别为 $o(x_0, y_0, z_0)$, $a(x_a, y_a, z_a)$, $b(x_b, y_b, z_b)$, $c(x_c, y_c, z_c)$ ，从这 4 个坐标选取高程数值的最小值，以此数值创建绝对水平 $z = z_0$ ；同理再以塔脚的 4 个坐标中选取高程数值最大值，以此数值创建绝对水平面 $Z = Z_0$ 。

(2) 求出每条棱的空间直线方程

以 $o(x_0, y_0, z_0)$, $O(X_0, Y_0, Z_0)$ 为例，构建空间直线计算方程如下：

$$\frac{X - x_0}{X_0 - x_0} = \frac{Y - y_0}{Y_0 - y_0} = \frac{Z - z_0}{Z_0 - z_0} \quad (3-1)$$

同理求出杆塔其余棱的空间直线方程。

(3) 修正坐标

为提高另外 3 个交点位置的精确度，利用棱的空间直线方程与绝对水平面方程联立，计算出其他 3 个塔角点修正值。

(4) 确定上下绝对水平米面的中心点经过修正获得的 4 个点依次相连，即为修正后的四楼台顶面，此四边形对角线交点即为杆塔顶部中心点 p ，同理可获得底部的中心点坐标 P 点。

(5) 计算杆塔的高度和倾斜值

根据直线 pP 与竖直方向的法向量间的夹角 θ ，即可求出杆塔倾斜角度如下：

$$q = \tan\theta \quad (3-2)$$

4. 测量算法的实现

由上文可知，可通过在杆塔三维模型中获取接近塔脚和较高处的 8 个点坐标，可完成杆塔倾斜度计算。为解决人工计算数据量大、耗时、易出错等问题，本文提出采用电力杆塔数学模型测量方法，并使用计算机语言实现。该方法通过构建电力杆塔实景三维模型，在其中提取所需坐标数据并转化为空间几何模型结构，然后进行绝对水平面和棱线构建、坐标修正以及中心点确定等步骤来完成机器语言的杆塔倾斜度计算。这种方法简单快捷，只需要输入坐标数据即可完成计算，并且能够减少人工参与从而提升效率，具体流程如图 5 所示。

4. 成果展现

无人机根据预设飞行航线任务自主化巡航飞行，搭载云台相机自动采集矿区铁塔图像数据，将数据回传后端，基于铁塔倾斜、偏移算法，根据铁塔倾斜、偏移特征提取，对矿区铁塔进行倾斜及偏移的快速检测。

通过将无人机飞控技术、网络通信技术、高精度定位技术、流媒体传输技术、AI 识别算法技术等先进技术应用于煤矿区铁塔倾斜及偏移巡检工作中去，实现对整个目标区域的铁塔的快速、机动、高频的无人机自主化巡检，对矿区铁塔倾斜角度以及危险性进行巡视、数据采集并分析。同时基于机器学习能力，通过机器学习去除噪声背景数据干扰，提高故障识别和定位精度，能够自动分析图像特征，对事件识别进行自动诊断，提高诊断检测准确率与效率，如图 6 所示。

通过无人机对矿区铁塔进行多角度多方位的图片资料数据采集，分析出矿区铁塔倾斜角度，并且对矿区铁塔周边的地质沉降做出分析判断，进而开展全自动化的巡检任务。最终达到对矿区铁塔的快速、

精确的巡视，高效探测、预警、防治矿区周边地质问题。

5. 结束语

无人机矿区铁塔巡检是一种安全、高效、经济的方式，本文基于无人机遥感技术，从测量原理及测量流程进行分析，将其实际应用于电力杆塔的倾斜度检测当中。通过建立巡查区域的高精度地图，建立无人机自动化巡检场景，自动生成无人机铁塔巡检航线，无人机一键起飞后，将自动飞往巡查点，单架无人机的巡查范围为半径 5 KM，40 min 完成单次巡飞。故在矿区的铁塔巡检中，无人机巡检可以充分

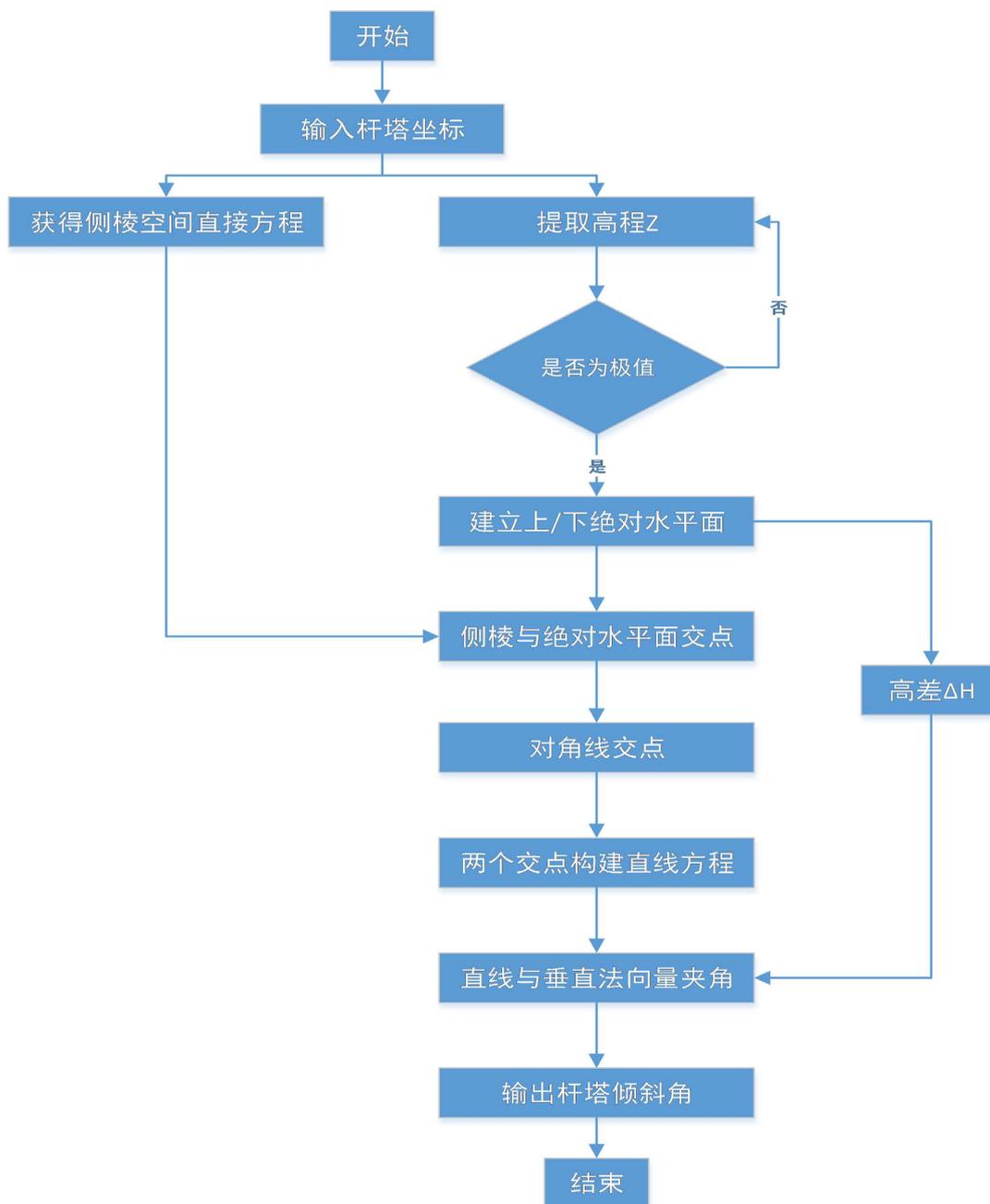


Figure 5. Inclination calculation process
图 5. 倾斜度计算流程



Figure 6. Results display diagram
图 6. 成果展示图

应用，并保证巡飞效率。完成了电力杆塔的三维模型构建并在此基础上实现了电力杆塔的倾斜检测。通过对电力杆塔的倾斜度进行高效检测，可以有效感知矿区周边地质沉降等问题，为保护矿区周边地质环境做出及时有效的预警，为后期防治工作打下基础。

参考文献

- [1] 国家能源局. DL/T 741-2010 架空送电线路运行规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 陈亮. 基于高密度机载点云的输电线路杆塔信息提取[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- [3] 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(3): 389-399.
- [4] 巴海涛. 无人机航迹规划研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [5] 徐颖章. 基于 RTK 的高精度无人机定位导航技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [6] 王佳轩. 光学图像中无人机目标的多尺度检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [7] 姚煜. 基于无人机遥感技术的电力杆塔倾斜检测[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.