

# 基于无人机倾斜摄影建模的杆塔结构健康状态评估与倾斜风险预测

李江春

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650217

**摘要：**文章聚焦基于无人机倾斜摄影建模的杆塔结构健康状态评估与倾斜风险预测。先阐述无人机倾斜摄影建模技术原理，分析杆塔类型、结构特征及常见缺陷与倾斜影响因素。接着优化杆塔三维建模技术，包括数据采集方案与处理流程。随后构建健康状态评估体系，涵盖指标设计、分级评估模型及验证优化。最后筛选量化倾斜风险影响因素，构建预测模型并进行动态更新与适应性验证，为杆塔安全运行提供全面支持。

**关键词：**无人机倾斜摄影；三维点云；杆塔结构健康评估；倾斜风险预测

## 1 无人机倾斜摄影建模技术基础与杆塔结构特征分析

### 1.1 无人机倾斜摄影建模技术原理

无人机倾斜摄影技术通过在无人机上搭载多台传感器，同时从垂直、倾斜等不同角度采集地面物体的影像信息。在飞行过程中，无人机按照预设的航线和参数进行飞行，传感器实时获取高分辨率的倾斜影像。这些影像不仅包含了地面物体的顶部信息，还包含了侧面信息，能够更全面地反映物体的几何形状和空间位置。获取倾斜影像后，利用专业的三维建模软件进行数据处理。首先对影像进行预处理，包括图像增强、畸变校正等操作，以提高影像质量。然后通过特征提取和匹配算法，找出不同影像之间的同名点，建立影像之间的几何关系<sup>[1]</sup>。接着利用空中三角测量技术，求解影像的外方位元素，确定每张影像在空间中的位置和姿态。最后基于多视影像匹配和密集匹配技术，生成地面物体的三维点云数据，并通过构建三角网模型和纹理映射，生成具有真实感的三维模型。

### 1.2 输电线路杆塔类型与结构特征

输电线路杆塔根据其用途和结构形式可分为多种类型。按用途可分为耐张塔、直线塔、转角塔、终端塔等。耐张塔主要用于承受导线的张力，起到分段控制和限制事故范围的作用；直线塔用于支撑导线，使导线保持一定的几何形状；转角塔用于改变线路的走向；终端塔则位于线路的起点或终点，承受导线的全部拉力。从结构形式上看，杆塔可分为钢结构杆塔和钢筋混凝土杆塔。钢结构杆塔具有强度高、重量轻、施工方便等优点，广泛应用于高压和超高压输电线路；钢筋混凝土杆塔则具有造价低、耐久性好等特点，常用于中低压输电线路。不同类型的杆塔在结构上具有各自的特点。

### 1.3 杆塔结构常见缺陷与倾斜影响因素

杆塔在长期运行过程中，由于受到自然环境、外力作用等因素的影响，容易出现各种结构缺陷。常见的缺陷包括杆塔倾斜、构件变形、螺栓松动、锈蚀等。杆塔倾斜是最为严重的问题之一，会导致导线弧垂发生变化，影响电力传输的安全性和稳定性。影响杆塔倾斜的因素主要包括地质条件、气象因素、外力破坏等。地质条件方面，软土地基、地下水位变化等会导致杆塔基础不均匀沉降，从而引起杆塔倾斜；气象因素中，大风、暴雨、冰雪等恶劣天气会对杆塔产生较大的外力作用，可能导致杆塔倾斜或倒塌；外力破坏如车辆碰撞、施工机械碰撞等也会直接造成杆塔损坏和倾斜。

## 2 无人机倾斜摄影杆塔三维建模技术优化

### 2.1 建模数据采集方案设计

合理且完善的数据采集方案是确保三维建模质量达到高标准的关键所在。在进行杆塔数据采集工作之前，必须全面且细致地考量杆塔的类型、实际高度以及周边环境等诸多因素，以此为基础精心制定一套详尽周全的飞行计划。首先，要精准确定飞行区域，这一区域不仅要完整覆盖杆塔本身，还需涵盖其周边一定范围的环境信息，如此才能为后续建模提供充足的数据支撑。接着，依据杆塔的高度和复杂的地形条件，慎重选择合适的飞行高度与速度。通常情况下，飞行高度越低，所获取影像的分辨率就越高，但同时飞行范围也会受到相应限制；而飞行速度一旦过快，就极易导致影像模糊，进而严重影响建模精度。与此同时，相机参数的合理设置也不容忽视，像焦距、光圈、快门速度等参数，都需要根据实际情况进行精准调整，以此保证影像具备足够的清晰度和适宜的亮度。在飞行过程中，采用多航线、多

角度的飞行方式，能够显著增加影像的重叠度，有效提高特征匹配的准确性和三维模型的精度。另外，为最大程度减少天气因素对数据采集的干扰，应尽量选择在天气晴朗、光照充足且稳定的条件下开展飞行作业。

## 2.2 三维建模数据处理流程优化

为了提高三维建模的效率和质量，需要对数据处理流程进行优化。在影像预处理阶段，采用先进的图像处理算法，如自适应滤波、对比度增强等，进一步改善影像质量<sup>[2]</sup>。在特征提取和匹配环节，利用基于深度学习的特征提取方法，提高特征点的提取精度和匹配效率。空中三角测量是三维建模的关键步骤，通过优化平差算法，提高外方位元素的求解精度。在生成三维点云数据后，采用点云滤波和分类算法，去除噪声点和无关点云，提取出杆塔的点云数据。在构建三角网模型时，根据杆塔的结构特点选择合适的网格生成算法，保证模型的几何精度和表面光滑度。最后，通过纹理映射技术，将高分辨率的影像纹理映射到三维模型上，生成具有真实感的三维模型。

## 3 基于三维模型的杆塔结构健康状态评估体系构建

### 3.1 健康评估指标设计

基于三维模型的杆塔结构健康状态评估，设计一套科学合理的评估指标是精准评估的关键所在。评估指标需全面且细致地涵盖杆塔的各个方面，从宏观到微观，以准确反映其健康状况。在几何形状方面，杆塔的倾斜度是反映其整体稳定性关键指标。在实际测量中，可通过高精度的测量仪器，精确测量杆塔顶部相对于底部的偏移量，再结合杆塔的高度，准确计算出倾斜度。结构变形上，构件的变形量能直观反映杆塔局部结构的受力情况。通过将三维模型中构件的实际尺寸与设计尺寸进行细致对比，若实际尺寸与设计尺寸偏差超出一定范围，则表明构件可能发生了变形。构件损伤方面，螺栓的松动情况不容忽视。借助先进的三维点云数据处理技术，深入分析螺栓周围的三维点云数据，检测螺栓与连接件之间的间隙。若间隙超出正常范围，即可判定螺栓出现松动。杆塔的锈蚀程度和基础沉降也是重要指标。锈蚀程度可通过高清图像采集设备获取杆塔表面图像，运用图像分析技术对表面纹理进行深入分析，并统计锈蚀面积来评估。基础沉降则可通过定期测量杆塔基础周围地面的高程变化，根据高程变化数据确定基础沉降情况。

### 3.2 健康状态分级评估模型

为了准确评估杆塔的健康状态，需依据评估指标的重要性和影响程度，构建科学合理的健康状态分级评估模型。层次分析法（AHP）是一种有效确定各评估指

标权重的方法。它通过将复杂问题分解为多个层次，对同一层次的指标进行两两比较，确定其相对重要性，进而计算出各指标的权重。基于这些权重，将杆塔的健康状态划分为良好、一般、较差、严重四个等级，并为每个等级制定详细的评估标准和阈值。例如，当杆塔的倾斜度小于规定的安全阈值、构件变形量在允许的弹性范围内、螺栓无松动现象、锈蚀程度较轻且未影响结构强度、基础沉降稳定且在允许范围内时，可评定为良好状态。当部分指标超出良好状态的范围，但尚未对杆塔的整体安全运行产生实质性影响时，评定为一般状态。若多个指标出现异常，杆塔存在一定的安全隐患，如倾斜度接近临界值、部分构件出现明显变形等，则评定为较差状态。当杆塔出现严重倾斜、构件断裂等直接危及安全的情况时，评定为严重状态<sup>[3]</sup>。

### 3.3 评估模型验证与优化

为确保评估模型的准确性和可靠性，必须进行严格的验证。收集大量实际的杆塔检测数据和历史故障记录，这些数据应涵盖不同地区、不同类型、不同运行年限的杆塔，以保证验证的全面性和代表性。将基于三维模型的评估结果与实际检测结果进行细致对比分析，计算评估的准确率、误判率等关键指标。准确率反映了模型正确评估杆塔健康状态的能力，误判率则体现了模型出现错误判断的概率。如果评估结果与实际情况存在较大偏差，就需要对评估模型进行深入优化。分析偏差产生的原因，可能是评估指标选取不够全面或不合理，未能涵盖所有影响杆塔健康状态的关键因素；也可能是权重分配不准确，导致某些重要指标在评估中的作用未得到充分体现；还可能是评估标准不够严格，对一些轻微异常情况的判定不够敏感。根据分析结果，对评估模型进行有针对性的调整和改进，如增加或删除评估指标、重新分配权重、优化评估标准等，不断提高评估模型的性能，使其能够更准确地评估杆塔的健康状态。

## 4 基于多因素耦合的杆塔倾斜风险预测模型

### 4.1 倾斜风险影响因素筛选与量化

杆塔倾斜是一个复杂的现象，受多种因素交织影响，精准筛选并量化主要影响因素是构建有效预测模型的关键前提。通过对大量历史杆塔倾斜案例数据的深入剖析，同时充分借鉴电力领域专家的丰富经验，最终确定地质条件、气象因素、杆塔结构参数等为影响杆塔倾斜的主要因素。地质条件方面，土壤承载力是衡量土壤支撑杆塔能力的重要指标，承载力不足可能导致杆塔基础下沉，引发倾斜，可通过标准贯入试验等方法进行量化测定；地下水位的变化会影响土壤的物理性质，进而

影响杆塔稳定性，可通过设置水位监测井获取实时数据来量化。气象因素中，风速大小直接影响杆塔所受风荷载，风向决定了风荷载的作用方向，二者可通过气象站的风速风向仪实时获取；降雨量过多可能引发土壤侵蚀，削弱杆塔基础，可通过雨量计进行量化记录。杆塔结构参数上，杆塔高度越高，受风等外力作用的影响越大；截面尺寸决定了杆塔的抗弯刚度；材料强度影响杆塔的承载能力，这些参数均可从杆塔的设计资料中准确获取。为深入探究各因素间的相互作用，采用相关性分析等方法，明确因素间的耦合关系，为后续模型构建提供全面依据。

#### 4.2 倾斜风险预测模型构建

在完成倾斜风险影响因素的筛选与量化后，即可基于这些数据构建杆塔倾斜风险预测模型。机器学习算法凭借其强大的数据处理和模式识别能力，成为构建预测模型的理想选择，如支持向量机（SVM）、神经网络等算法都具备出色的预测性能。构建模型时，首先将历史数据按照一定比例划分为训练集和测试集。训练集用于模型的学习和训练，通过不断调整模型的参数，使模型能够从历史数据中学习到杆塔倾斜与各影响因素之间的内在规律。在训练过程中，采用交叉验证等方法优化模型的结构和参数，提高模型的泛化能力，避免出现过拟合现象，确保模型在面对新数据时也能有较好的预测效果。完成训练后，利用测试集对训练好的模型进行验证，通过计算预测值与实际值之间的误差指标，如均方误差、平均绝对误差等，评估模型的性能。如果模型的预测效果不理想，说明当前选取的影响因素可能不够全面或者模型算法不适合该问题，需要重新筛选影响因素或调整模型算法，直至模型达到满意的预测精度。

#### 4.3 模型动态更新与适应性验证

杆塔所处的环境是不断变化的，随着时间的推移，地质条件可能因地质活动发生改变，气象模式也可能出现异常变化，这些都会导致杆塔的倾斜风险影响因素随

之改变。因此，对预测模型进行动态更新是保证模型准确性和适应性的必要措施。定期收集新的杆塔检测数据和环境监测数据，将这些数据加入到历史数据中，形成更新后的数据集。利用更新后的数据集重新训练和优化预测模型，使模型能够及时反映最新的影响因素变化情况<sup>[4]</sup>。同时，为检验更新后模型在不同条件下的预测效果，进行模型的适应性验证。将更新后的模型应用于不同地区、不同类型的杆塔，对比模型的预测结果与实际情况。如果模型在某些地区或类型的杆塔上预测效果不佳，说明模型在该条件下可能存在局限性。根据验证结果对模型进行进一步的调整和改进，例如增加特定地区或类型杆塔的特殊影响因素，优化模型的算法结构等，使模型能够更好地适应各种实际情况，为杆塔的安全运行提供可靠的预测支持。

#### 结束语

本文围绕无人机倾斜摄影建模展开对杆塔结构健康状态评估与倾斜风险预测的研究，从技术原理到模型构建，再到评估与预测体系的完善，形成了一套较为系统的研究框架。通过不断优化建模技术、精准设计评估指标、构建科学预测模型并动态更新，有效提升了杆塔健康评估的准确性与倾斜风险预测的可靠性。未来，可进一步结合新技术，持续完善研究，保障电力输电线路的安全稳定运行。

#### 参考文献

- [1]王娜.地面控制点数量对倾斜摄影模型精度的影响分析[J].测绘通报,2021(2):56-59+70.
- [2]王海燕,张伟.输电杆塔结构健康监测技术现状与发展[J].电力工程技术,2022,41(2):34-39.
- [3]刘杰,陈明.光纤传感技术在电力杆塔应力监测中的应用研究[J].传感技术学报,2021,34(6):821-826.
- [4]赵刚,李娜.基于物联网的输电线路杆塔状态监测系统设计[J].自动化与仪表,2020(5):123-126.