

ICS: 49.020

CCS: V04

# 团体标准

T/AOPA 0055—2023

## 架空输电线路使用多旋翼无人机三维激光 建模及自动巡检全流程技术规范

The whole process of 3D laser modeling and automatic  
inspection of multi rotor UAV used in overhead transmission  
line

2023-12-19 发布

2023-12-19 实施

中国航空器拥有者及驾驶员协会 发布

## 目次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 三维激光建模	2
5 自动巡检	11
附录 A (资料性) 点云分类表	17
附录 B (资料性) 不同塔型拍摄内容	19
附录 C (资料性) 不同塔型巡检路径	20
附录 D (规范性) 无人机作业安全检查表	30
附录 E (规范性) 无人机现场作业记录表	31
附录 F (资料性) 无人机三维激光扫描资料移交清单	32
附录 G (规范性) 数据质量检查表	33
附录 H (资料性) 无人机巡视内容	34
附录 I (规范性) 自动驾驶作业记录表	36
附录 J (资料性) 数据归档目录规范	37
附录 K (资料性) 数据文件命名规则	38
附录 L (资料性) 不同塔型拍摄要求	39
附录 M (资料性) 现场人员配备	60
附录 N (资料性) 现场(作业)风险及预控措施表	61
附录 O (资料性) 主要设备及工器具配备	62
附录 P (资料性) 精度值要求	64
附录 Q (资料性) 无人机硬件技术要求	65

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国航空器拥有者及驾驶员协会提出。

本文件由中国航空器拥有者及驾驶员协会归口。

本文件起草单位：云南电网有限责任公司输电分公司、国家电网浙江省电力有限公司超高压分公司、国家电网福建省电力有限公司漳州供电公司、国家电网电力空间技术有限公司。

本文件主要起草人：周重孚、黄俊波、罗哲轩、赵中志、张原宁、孙斌、李俊鹏、张辉、徐真、高振宇、沈志、丁建、陈杰、李春峰、王和平、武艺、沈建、汪骏、王淼、郭晓冰。

## 引 言

多旋翼无人机输电线路自主巡视主要通过对 RTK 和激光点云技术在多旋翼无人机智能沿线飞行中的应用研究，解决有人控制多旋翼无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，促进输电线路走廊数字化管理，不断强化数据分析及应用，实施差异化、精益化管控，提高工作质量、提升工作效率，降低劳动强度，确保输电设备、作业安全。

# 架空输电线路使用多旋翼无人机三维激光建模及自动巡检 全流程技术规范

## 1 范围

本文件描述了开展激光雷达数据采集（处理）及架空输电线路多旋翼无人机自动巡检作业工作的范围、步骤和方法。

本文件适用于中小型多旋翼无人机搭载三维激光雷达扫描设备开展三维建模工作，包含无人机激光雷达采集电力巡线数据处理的基本要求、数据内容、精细化巡检、质量控制、成果验收及 35 kV 及以上电压等级架空输电线路的多旋翼无人机自动巡检作业和技术要求。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 26859 电业安全工作规程（电力线路部分）
- GB/T 27919 IMU/GPS 辅助航空摄影技术规范
- GB 50233 110~500 kV 架空电力线路施工及验收规范
- GB 50545 110~750 kV 架空送电线路设计技术规程
- DL/T 436 高压直流架空送电线路技术导则
- DL/T 741 架空输电线路运行规程
- DL/T 5138 架空送电线路航空摄影测量技术规程
- DL/T 5217 220 kV~500 kV 紧凑型架空送电线路设计技术规定
- CH/T 8024 机载激光雷达数据获取技术规范
- CH/T 8023 机载激光雷达数据处理技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**点云 Point Cloud**

以离散、不规则方式分布在三维空间中的点的集合。

### 3.2

**点云密度 Point Cloud Density**

点云的重要属性特征，反映激光点云的空间分布及密集程度。

### 3.3

**危险点 Danger Points**

以电力走廊内的关键对象电力线和电线塔为核心，检测到的安全距离阈值范围内的点。

### 3.4

**激光雷达测量 LiDAR Measurement**

以固定式或移动平台为载体，通过发射激光获取地物表面三维坐标和反射强度等信息的主动式

测量技术。

### 3.5

#### 自动驾驶 Automatic pilot

由飞行控制系统按照预先规划的航线自动控制无人机飞行的飞行模式。

### 3.6

#### 自动驾驶模式 Automatic pilot mode

自动驾驶模式有通道巡检、树障巡检和精细化巡检 3 种模式。

### 3.7

#### 实时动态载波相位差分 Real-time kinematic

RTK (Real - time kinematic, 实时动态) 载波相位差分技术, 是实时处理两个测量站载波相位观测量的差分方法, 将基准站采集的载波相位发给用户接收机, 进行求差解算坐标。常用两种 RTK 模式, 单基站 RTK 与网络 RTK。

### 3.8

#### 国际地理数字信息 Keyhole Markup Language

KML 是国际地理信息系统标准图层文件, 利用 XML 语法格式描述地理空间数据 (如点、线、面、多边形和模型等), 适合网络环境下的地理信息协作与共享。

### 3.9

#### 激光雷达点云 Lidar point cloud

LiDAR (Light Detection and Ranging), 是激光探测及测距系统的简称, 另外也称 Laser Radar 或 LADAR (Laser Detection and Ranging), 由激光雷达进行扫描所获取的数据, 即为激光雷达点云数据。

### 3.10

#### 地面基站 Ground base station

地面基站一般架设在已知点上, 通过已知坐标反求各类误差影响, 然后通过无线电传送这些误差给流动站, 从而使流动站迅速获取误差校正, 提高实时定位精度。

### 3.11

#### GPS 全球定位系统 Global Positioning System

全球定位系统 (Global Positioning System, GPS), 是一种以人造地球卫星为基础的高精度无线电导航的定位系统, 它在全球任何地方以及近地空间都能够提供准确的地理位置、车行速度及精确的时间信息。

### 3.12

#### 投影坐标系 Universal Transverse Mercator Grid System

自动驾驶航线所用点云数据坐标均采用 UTM 投影坐标系。UTM 投影全称为“通用横轴墨卡托投影” UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR PROJECTION, 是一种“等角横轴割圆柱投影”, 椭圆柱割地球于南纬 80 度、北纬 84 度两条等高圈, 投影后两条相割的经线上没有变形, 而中央经线上长度比 0.9996。UTM 投影是为了全球战争需要创建的, 美国于 1948 年完成这种通用投影系统的计算。与高斯-克吕格投影相似, 该投影角度没有变形, 中央经线为直线, 且为投影的对称轴, 中央经线的比例因子取 0.9996 是为了保证离中央经线 180km 处有两条不失真的标准经线。

### 3.13

#### 全球卫星导航系统 Global Navigation Satellite System

也称为全球导航卫星系统, 是能在地球表面或近地空间的任何地点为用户提供全天候的 3 维坐标和速度以及时间信息的空基无线电导航定位系统。

## 4 三维激光建模

## 4.1 数据采集工作规范

### 4.1.1 现场（作业）要求

#### 4.1.1.1 一般要求

为加强架空输电线路无人机巡检作业现场管理，规范各类现场人员的行为，保证人身、电网和设备安全，应遵循国家有关法律法规，并结合电力生产的实际，开展架空输电线路无人机巡检作业。

#### 4.1.1.2 现场（作业）条件

现场（作业）人员应被告知其作业现场和工作岗位存在的危险因素、防范措施及事故紧急处理措施。

#### 4.1.1.3 现场（作业）人员配置

开展无人机三维激光进行架空输电线路巡检作业时，作业人员包括工作负责人和工作班成员，工作班成员包括无人机操作员和设备操作人员。作业人员配备详见附录 M。

#### 4.1.1.4 现场（作业）人员件要求

- a) 具备中国民用航空局颁发的“驾驶员证”及以上资质证件；
- b) 具备一年及以上输电线路运维经验。

### 4.1.2 现场（作业）流程

无人机三维激光雷达扫描测量作业流程包括：作业准备、工作联系单报送、飞行申报协调、三维激光雷达扫描作业、扫描测量数据统计、扫描测量资料处理、扫描测量原始资料及处理资料移交。作业流程图（图 1）。

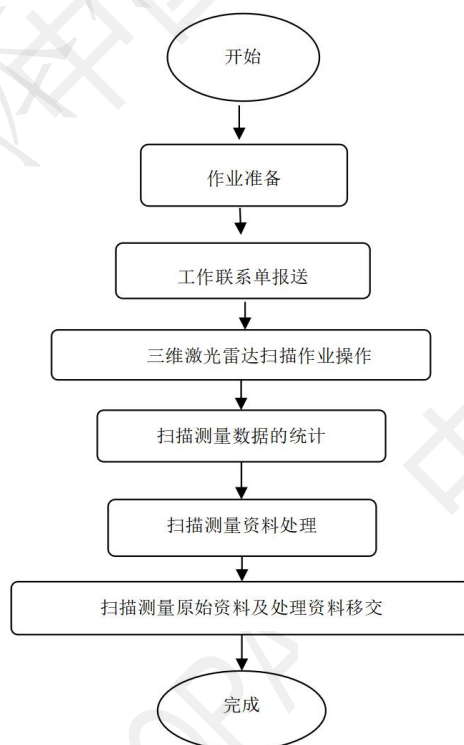


图 1 作业流程图

### 4.1.3 安全风险与预控

详见附录 N。

### 4.1.4 作业步骤

#### 4.1.4.1 作业准备

##### 4.1.4.1.1 设备及工器具准备

详见附录 O。

##### 4.1.4.1.2 技术资料准备

根据扫描任务要求，收集所需扫描架空输电线路的地理位置分布图，熟悉线路走向，地形地貌以及机场重要设施等情况。收集所需巡视架空输电线路的杆塔明细表和经纬度坐标，熟悉线路电压等级、交叉跨越及架设方式。查询巡视线路所在地区的天气情况，提前做好飞行准备。

##### 4.1.4.1.3 空域申请

无人机现场巡检（作业）应严格按照国家相关政策法规、当地民航军管等要求规范化使用空域。工作负责人根据无人机巡检作业计划，按相关要求办理空域审批手续，并密切跟踪当地空域变化情况。

#### 4.1.4.2 现场实施规划

##### 4.1.4.2.1 航线规划

###### 4.1.4.2.1.1 航线规划要求

航线规划要求如下：

- a) 严格按照批复后的空域进行航线规划；
- b) 根据现场巡检（作业）要求和所用无人机巡检系统技术性能进行航线规划；
- c) 航线规划应避开空中管制区、重要建筑和设施，尽量避开人员活动密集区、通讯阻隔区、无线电干扰区、大风或切变风多发区和森林防火区等地区。对首次进行无人机巡检作业的线段，航线规划时应留有充足裕量，与以上区域保持足够的安全距离；
- d) 航线规划时，无人机巡检系统飞行航时应留有裕度。对已经飞行过的巡检作业航线，每架次任务的飞行航时应不超过无人机巡检系统作业航时，并留有一定裕量。对首次实际飞行的巡检作业航线，每架次任务的飞行航时应充分考虑无人机巡检系统作业航时，留有充足裕量；
- e) 选定的无人机巡检系统起飞和降落区应远离公路、铁路、重要建筑和设施，尽量避开周边军事禁区、军事管理区、森林防火区和人员活动密集区等，且满足对应机型的技术指标要求；
- f) 切入、出主航线时，平行于待测线路起点杆塔和第二个所确定的直线方向，并保证切入出点距到最近的待测杆塔水平离50 m以上，降低拐弯时所采集的数据对最终成果影响；
- g) 对于偏离之前两级杆塔所确定的直线角度不大的情况，若第三级杆的横向偏移距离小于激光雷达的测距，则尽量不设置转弯。

###### 4.1.4.2.1.2 航线规划流程

到达线路相应作业点，确认线路和杆塔，核实无误后，开始进行航线规划工作。操作流程如下：

- a) 到测区场地进行实地勘察，选择合理的起飞点。要求：5 m×5 m以上的空地，尽量靠近测区减少无人机进入测区的距离；
- b) 利用具备定点功能的无人机沿待测量线路飞行，选取合适的航点，航点数量不宜过多，控制在50个点以内，尽量保证飞行器直线飞行；
- c) 在设计航线时如航线方向须改变，应保证无人机在待测线路以外用“协调转弯”模式通过；
- d) 到达任务折返点时，直线飞行超过最后一级杆塔后至少50 m后，添加2个以上的航点，均设置为“协调转弯”模式，平滑改变飞行方向；
- e) 切入、切出主航线时，应平行于待测线路起点杆塔和第二个杆塔所确定的直线方向，并保证切入切出点距到最近的待测杆塔水平距离50 m以上；
- f) 航线设计飞行速度应保持5—9 m/s。

#### 4.1.4.2.2 现场实施操作

##### 4.1.4.2.2.1 数据采集

- a) 架设基站并记录基站数据。
  - 基站须架设在开阔、无遮挡和无信号干扰的区域。已知干扰源：雷达附近、手机信号塔附近（保证基站距塔200 m以上）、电力线正下方、变压器附近（保证基站距塔200 m以上）、变电站附近（保证基站距塔200 m以上）金属矿物质山附近、钢筋混凝土桥面；
  - 若多个架次采集的数据应拼接在一起，则要将基站固定到同一位置不动。多架次采集的数据用这同一个基站数据（基站覆盖范围：半径30 km）解算。对于作业距离超过30 km，又应要多站数据精度拼接的，对于预架设基站点进行作业精度要求相应的控制测量工作；
  - 作业前先摆放基站，最后一个架次飞行完下载好机载数据后，再按基站三秒Save键，保存灯灭（基站停止记录数据），拔掉电源，再将基站数据拷出；
  - 基站开机记录时间应早于雷达设备开机时间，确保基站观测时间要完全覆盖POS设备时间，数据采集过程中，禁止碰撞、移动基站。
- b) 根据设备产品说明书完成安装、接线及调试。
  - 连接好无人机及激光雷达系统，将设备固定在无人机上，检查并确认相机SD卡已插入且未拨到硬件写保护状态，且相机镜头盖已摘下；
  - 天线夹应牢固，天线线缆应拧紧，天线及折叠天线杆应安装牢固，天线线缆接头应拧紧，设备快拆挂载件应安装牢固，设备电源线接头应紧固等。
- c) 进行作业安全检查并填写无人机作业安全检查表。
  - 飞机所用电池及设备配套的电池应是满电状态，作业通电顺序为无人机遥控先通电，再打开设备；作业结束时先关闭设备，再将无人机遥控断电；
  - 设备起降点应空旷（GPS天线10°至170°内无遮挡物）、无信号干扰（雷达、手机信号塔、变压器、变电站、金属矿物质山附近及高压线正下方）；
  - 检查设备各指示灯状态正常；
  - 无人机操作员检查规划航线、飞行高度、速度、航线间隔。遥控器解锁飞控轻推油门检查副翼、升降、方向控制应正确；
  - 检查螺旋桨无缺损，拨动电机旋转无异常，机臂快拆结构件应拧到位，各部位螺丝无松动、缺失，动力电池应安装到位；
  - 无人机起飞前，应避免附近有高大树木和建筑物遮挡，以免遮挡GNSS信号；
  - 开始采集IMU数据后，起飞后在安全高度绕“8”字一次后进入航线；

- 无人机激光扫描系统扫描输电线路，进行各类数据（包括激光点云数据、影像数据、GNSS/IMU数据）采集时，系统操作员应及时填写《无人机现场作业记录表》；
- 执行航线任务结束无人机降落并停稳后，宜等候至少5min再关闭设备电源。

#### 4.1.4.2.2.2 数据下载

现场巡检（作业）结束后，应按照三维激光雷达巡检系统要求进行数据下载工作，包括基准站数据、激光雷达数据、影像数据、GPS 和 IMU 数据。

#### 4.1.4.2.2.3 航后检查

- a) 空中作业完毕，记录此次线路巡视的终点位置，包含线路名称、杆塔号及经纬度坐标。填写《无人机现场作业记录表》，附录E；
- b) 当天巡检作业结束后，应按所用三维激光雷达巡检系统要求进行检查和维护工作，对外观及关键零部件进行检查；
- c) 当天巡检作业结束后，应清理现场，核对设备和工器具清单，确认现场无遗漏；
- d) 作业结束后，须及时将电池取出。取出的油品和电池应按要求保管。

#### 4.1.4.2.3 数据下载及检查

- a) 基站数据检查。
  - 检查各地面基站记录的原始数据是否存在异常，分析该数据是否可用；
  - 采用预报星历，并应保证95%以上的有效观测的高度角大于10；
  - 采集时段与飞行时段吻合，且采集频率要满足需求。
- b) POS数据检查。
  - 下载原始数据并存储，检查、分析数据记录编号的完整性；
  - IMU数据应正常且连续；
  - POS系统数据处理精度应满足要求。
- c) 点云数据检查。
  - 下载点云原始数据并存储，检查文件记录编号的完整性；
  - 航带间重叠满足要求，应大于30%，且无绝对漏洞；
  - 点云数据覆盖范围满足要求，应大于成图范围；
  - 为保证拼接，不同架次之间必须有重叠区域，重叠区域长度不应小于50 m；
  - 点云密度必须满足要求，保证线塔形状特征完整，每平方米不宜低于100点。

#### 4.1.4.3 数据预处理

##### 4.1.4.3.1 预处理的内容

对原始数据进行解码，获取 GPS 数据、IMU 数据和激光扫描仪数据等。将同一架次的 GPS 数据、IMU 数据、地面基站观测数据、飞行记录数据、基站控制点数据和激光数据等进行整理，生成满足要求的点云数据。

##### 4.1.4.3.2 POS 数据处理

POS 数据处理要求如下：

- a) 联合IMU数据、GPS数据、基准站观测数据、基准站坐标进行pos数据解算，生成POS数据；
- b) 通过GPS定位精度、姿态分离值等指标进行综合评定；
- c) 导出航迹文件成果，POS数据格式可为txt、pos或其他格式存储；
- d) 填写POS数据处理结果分析表。

#### 4.1.4.3.3 点云数据解算

点云数据解算要求如下：

- a) 联合POS数据和激光测距数据，附加系统检校数据，进行点云数据解算，生成三维点云；
- b) 点云数据须采用LiData、Las格式存储。

#### 4.1.4.3.4 真彩色点云生成（视实际作业目的执行本操作）

利用采集的影像数据和分类后的激光点云数据对航摄影像进行正射纠正，将纠正后的影像与激光点云进行融合，实现将影像所富含的色彩信息赋给相应的激光点云。生成的彩色点云要求纹理丰富、颜色直观、位置准确。

#### 4.1.4.3.5 成果资料整理

- a) 每日扫描完毕后，无人机扫描人员应根据扫描情况及飞行情况，编制无人机巡视报告，每周进行汇总并编制巡视周报，经无人机巡线作业主管部门审核后反馈给线路运行管辖单位；
- b) 对原始数据、中间数据、预处理成果数据进行分类保存与备份，原始数据应保存至少一式两份。

#### 4.1.5 质量控制措施

- a) 开展无人机巡线前，查询线路所在地区的天气情况，提前做好飞行准备；
- b) 检查设备安装牢固。安装时轻拿轻放，防止仪器跌落，或受到冲击；
- c) 在扫描前，请确保扫描镜干净无尘；
- d) 检查飞机电池及设备供电电池电量，确保电量足够支撑巡检工作；
- e) 检查无人机激光雷达巡检系统的存储空间，存储空间不足时须按设备操作规范清理存储空间，确保数据可正常存储；
- f) 无人机设备宜在线路或杆塔侧上方10 m以上的高度以5—9 m/s的速度飞行，并保持该高度与速度进行激光雷达数据和影像数据的采集；
- g) 基站观测时间要完全覆盖POS设备时间。一般基站开关机要与无人机飞行有时间差；
- h) 基站架设在空旷地区，附近不应有强烈反射卫星型号的物体（如大型建筑物等），远离大功率无线电发射源（如电视台、电台、微波站等），其距离不应小于200 m；远离高压输电线和微波无线电信号传送通道，其距离不应小于50 m；
- i) 数据采集过程中，禁止碰撞、移动基站；
- j) 对于要求绝对精度的项目，应将基站架设在已知控制点上。无已知点时，需使用RTK等设备获取精确的基站信息；
- k) 无人机达到正式航线高度后，进入正式航线前，宜绕1个“8”字；
- l) 无人机位于线路上方，沿输电线路走向飞行，与线路保持相对平行；
- m) 当天作业结束后对数据进行检查，检查是否存在遗漏。

#### 4.1.6 扫描资料移交

- a) 无人机三维激光雷达扫描测量的原始数据应及时整理，并完成扫描测量总结报告；
- b) 每条线路巡视结束后，将巡视资料在无人机/无人机电力作业技术支持系统中上传提交，巡视资料移交项目清单见附录F；
- c) 扫描测量产生的所有资料必须进行存储备份，扫描测量资料作业组留存后提交上传至无人机/无人机电力作业技术支持系统，存储在系统数据库中，以便进行资料查询和数据分析；

- d) 运维单位使用无人机/无人机电力作业技术支持系统中的数据，对疑似隐患进行核实并消除。

#### 4.1.7 设备管理

- a) 无人机三维激光雷达巡检系统应有专用库房进行存放和维护保养；
- b) 维护保养人员应按维护保养手册要求按时开展日常维护、零件维修更换、大修保养和试验等工作；
- c) 当无人机三维激光雷达巡检系统主要组成部件，如电机、飞控系统、通讯链路、扫描仪设备、相机、电台以及操作系统等进行了更换或升级后，运维单位应组织试验检测，确保巡检系统满足相关标准要求；
- d) 无人机三维激光雷达巡检系统所用电池应按要求进行充（放）电、性能检测等维护保养工作，确保电池性能良好；
- e) 无人机三维激光雷达巡检系统使用完后，检查扫描仪扫描窗口是否污染，如污染应立即清理。

### 4.2 数据处理工作规范

#### 4.2.1 检查采集数据

##### 4.2.1.1 采集数据完整性检查

- a) 基站数据，如果有基站坐标，确保基站坐标准确，基站点的坐标系一般为wgs84（卫星导航坐标系），高程为椭球高；
- b) IMU数据、点云原始文件、杆臂值、天线高、输出点云的矩阵等文件；
- c) 地面检查点，即用于精度检测的野外实测数据；
- d) 成果坐标系统与点云坐标系统之间的转换参数；
- e) 预处理后的点云数据和其他有关数据。

##### 4.2.1.2 基站数据检查

- a) 检查各地面基站记录的原始数据是否存在异常，分析该数据是否可用；
- b) 采用预报星历，并应保证95%以上的有效观测的高度角大于10°；
- c) 采集时段与飞行时段吻合，且采集频率要满足需求。

##### 4.2.1.3 POS 数据检查

- a) 下载原始数据并存储，检查、分析数据记录编号的完整性；
- b) IMU数据正常且连续；
- c) POS系统数据处理精度满足要求。

##### 4.2.1.4 点云数据检查

- a) 下载点云原始数据并存储，检查文件记录编号的完整性；
- b) 航带间重叠满足要求，应大于30%，且无绝对漏洞；
- c) 点云数据覆盖范围满足要求，应大于成图范围；
- d) 为保证拼接，不同架次之间必须有重叠区域，重叠区域长度须达到50 m；
- e) 点云密度必须满足要求，保证线塔形状特征完整，每平方米高于100点。

#### 4.2.2 数据处理

#### 4.2.2.1 数据解算

POS 数据的后差分解算，解算的有效航线内 pos 的各个精度值必须满足要求，详见附录 P。

#### 4.2.2.2 点云数据裁剪

根据杆塔位置和实际关注的线路走廊宽度对点云数据进行裁剪，减少点云数据量，提高处理效率。

#### 4.2.2.3 点云滤波分类

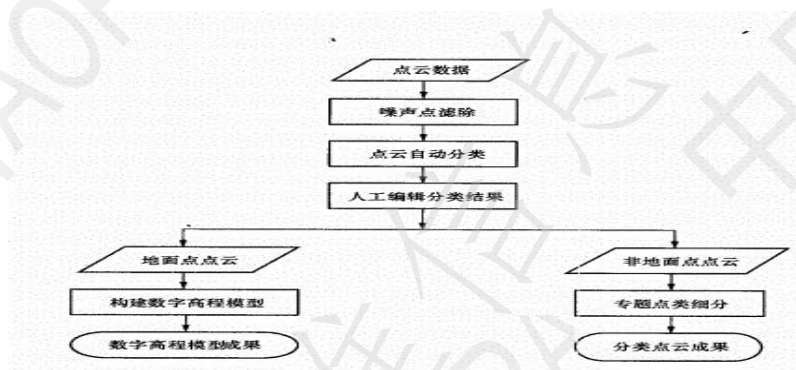


图2 点云分类流程图

注：专题点是根据应用需求区分的具有同一类地物表达的点，电力方面包括导线、地线、杆塔、交跨、房屋、植被、道路、桥梁等。

##### 4.2.2.3.1 噪声点滤除

将明显低于地面的点或点群（低点）和明显高于地表目标的点或点群（空中点），以及移动的物点定义为噪声点，在进行地面点分类之前，应首先将这类点分离出来。

##### 4.2.2.3.2 点云自动分类

点云数据分类要求如下：

- a) 可实现电力线、电力杆塔、植被、地面点等地物类别自动分类；
- b) 电力线/杆塔/植被/地面点等地物类别编码与电力生产要求一致。

##### 4.2.2.3.3 人工编辑分类结果

人工编辑分类结果主要包括：

- a) 对高程突变的区域，调整参数或算法，重新进行小面积的自动分类；
- b) 采用人工编辑的方式，对分类错误的点重新进行分类，例如导线误分成杆塔。

##### 4.2.2.4 危险点检测

- a) 危险点检测包括树障、水域、交跨线；
- b) 危险点检测过程中不应对点云进行抽稀处理；
- c) 对树障危险点应做出单木分割并对潜在的树生长和树倒危险点进行分析；
- d) 应对危险点检测结果进行复核；

- e) 各电压等级安全距离阈值参照《架空送电线路运行规程》（《架空输电线路运行规程》（DL/T 741—2019））。

#### 4.2.2.5 模拟工况分析

##### 4.2.2.5.1 矢量化

对处理后的导线点云数据进行矢量化，获取导线的瞬时工况曲线。同一耐张段内杆塔的挂点两边导线在挂点处需要完全重合。尤其是对于直线塔的挂点，必须是完全重合的。矢量化后的导线必须是连续的，不能有断线。

##### 4.2.2.5.2 模拟工况分析

- a) 大风、覆冰模拟，设置实时工况参数（导线温度、覆冰厚度、风速）以及模拟工况参数，分析模拟工况下的净空距离；
- b) 树生长分析，设置树生长参数，根据危险点检测参数（.xml），判断树木生长情况下的净空距离，分析可能出现的净空危险点；
- c) 树倒分析，设置单木分割参数，根据危险点检测参数（.xml），判断树木倒伏情况下的净空距离，分析可能出现的净空危险点。

##### 4.2.2.6 生成图像

为直观表征危险点信息，宜生成危险点相关侧视图、俯视图等图像。

##### 4.2.2.7 生成报告

- a) 根据分析结果，输出输电线路危险点检测报告，主要要求如下：
- b) 对发现的安全风险点应提供坐标、距小号塔距离、定级等；
- c) 检查杆塔区间与图片上的杆塔号是否相符；
- d) 检查图片上的杆塔号是否清楚、缺失；
- e) 检查分析结果txt中的点经纬度坐标值是否与台账中点的UTM度带值相符合；
- f) 检查危险点（红点）是否在导线上、地线上、杆塔上或者悬空；
- g) 检查危险点水平实测距离，垂直实测距离是否在运规范围之内；
- h) 检查危险点净空距离大于规程中规定的安全距离，净空距离检查方法：净空距离值必须大于水平、垂直距离，并且小于运规中定义的水平距离和垂直距离的斜边距离。例如：运规中定义的水平距离为7，垂直距离为6，那净空距离必须小于 $9.219(\sqrt{\text{pow}(7, 2)+\text{pow}(6, 2)})$ ；
- i) 检查危险点对地距离一定不能是0，如果为负值，则需要检查该危险点是否上交跨线。

#### 4.2.3 质量控制

##### 4.2.3.1 检查方法

- a) 对分类结果进行检查，通过将点云按分类、按高程显示等方法，目视检查分类后点云，对有疑问处用断面图进行查询、分析；
- b) 地面点检查一般采用建立地面模型的方法进行检查，对模型上不光滑、不连续处，绘制断面图进行查看。若有对应影像，可用来辅助检查分类的可靠性。

##### 4.2.3.1.1 检查内容

检查的内容主要包括：

- a) 点云分类是否正确，包括电力线、电线塔、地面点等类别；
- b) 地面点云表面模型是否连续、光滑；
- c) 地面点的剖面图形态是否合理；
- d) 若有地形图或者影像，分类结果与地形图、影像套合，所分点类与影像范围是否一致；
- e) 重叠区域的点云偏差值应小于0.3 m；
- f) 航线规划必须进行安全性检查。

#### 4.2.4 成果验收及提交

各类成果的质量检查应满足相应规范要求。通过验收的成果按以下内容逐项登记整理并上交：

- a) 成果清单；
- b) 点云分类成果数据；
- c) 危险点检测报告；
- d) 采集的原始数据和其他相关资料。

### 5 自动巡检

#### 5.1 现场（作业）要求

##### 5.1.1 人员要求

现场（作业）人员均应具有1年及以上高压输电线路运行维护工作经验，熟悉航空、气象、地理等必要知识，掌握架空线路运行有关专业知识，并熟悉电力安全工作规程（线路）（GB/T 26859）的相关规定。无人机操作员应熟悉无人机巡检作业方法和技术手段，通过相应机型的操作培训，考试合格后持证上岗。

##### 5.1.2 装备要求

作业无人机需要满足一定的硬件要求，可拍摄和录制清晰的照片和视频，具有完善的定位导航系统，用于精细化巡检的多旋翼无人机需要搭载RTK定位设备，飞机需要具备智能的飞控系统，支持自定义飞行航线及动作，具体详见附录Q。

##### 5.1.3 现场及飞行要求

作业现场应远离爆破、射击、烟雾、火焰、机场、人群密集、高大建筑、军事管辖、无线电干扰等可能影响无人机飞行的区域。无人机起、降点应与输电线路和其他设施、设备保持足够的安全距离，且风向有利，具备起降条件。工作地点、起降点及起降航线上应避免无关人员干扰，必要时可设置安全警示区。

##### 5.1.4 气象要求

作业宜在良好天气下进行。雾、雪、大雨、大风、冰雹等恶劣天气不利于巡检作业的情况时，不应开展无人机巡检作业。起飞前，应确认现场风速符合该机型作业范围，巡检区域处于狭长地带或大档距、大落差、微气象等特殊区域时，现场负责人应根据无人机的性能及气象情况判断是否开展作业。

##### 5.1.5 通信要求

无人机与遥控器之间通过无线射频信号进行数据传输，所以必须保障遥控器与无人机之间通信良好，起飞前检查通信信号频段，看是否存在较大的干扰，选择合适的信号频段进行飞行，通信干扰比较大的情况，宜采用5G通讯链路，其他情况，宜采用2.4G通讯链路。如果使用网络RTK机型，

需要检查遥控器连接网络的情况，保证网络信号稳定，可以正常接入互联网，保证无人机的飞行安全。作业现场不应使用可能对无人机巡检系统通信链路造成干扰的电子设备。

#### 5.1.6 安全注意事项

无人机起飞和降落时，作业人员应与其始终保持足够的安全距离，不应站在其起飞和降落的方向前，不应站在无人机巡检航线的正下方。作业前，无人机应预先设置紧急情况下的安全策略。起飞前必须检查无人机以及支持作业的各个系统，指南针系统，导航系统，基站系统，通信系统，动力系统，影像系统，避障系统等是否正常，排除可能造成作业安全事故的一切不良因素。

#### 5.1.7 点云数据要求

##### 5.1.7.1 点云密度

点云密度应不小于 40 点/m<sup>2</sup>。

##### 5.1.7.2 点云数据分类

用于自动驾驶的输电线路点云数据应是经过点云分类后的数据，点云数据分类标准参见附录 A。

##### 5.1.7.3 点云覆盖完整性

杆塔点云，杆塔、横担、绝缘子、挂线点、跳线、基础等关键位置点云数据应覆盖完整；

- a) 导地线点云，导地线点云应连续没有漏洞；
- b) 交叉跨越点云，线路交叉跨越点云数据应完整，交叉跨越最高点、最低点点云数据不能遗漏；
- c) 通道点云，线路通道范围内地物点云应完整，线行两边的高山、高植被、高地物、通信杆塔等最高点云数据不应有遗漏；
- d) 点云重叠，多个架次拼接的点云数据不应有重影，否则需要重新采集。

##### 5.1.7.4 点云数据文件

点云数据文件以每一档为单位，一个文件，文件命名格式“杆塔编号（小号侧）—杆塔编号（大号侧）.las”。其中点云分类采用点云数据标记记录于点云二进制文件中。

##### 5.1.7.5 点云数据格式

点云数据格式为激光点云通用格式 las 格式。

#### 5.1.8 点云精度要求

输电线路自动驾驶作业全自动对杆塔部件进行拍摄，自动飞行，自动调整飞机姿态，自动对焦，自动拍照，需要高精度的定位。

##### 5.1.8.1 点云精度

用于航线规划的点云绝对位置精度误差宜在 0.2 m 以内，最大误差不超过 0.5 m。如果误差范围太大会导致设计的拍照航点无法对准目标部件，甚至出现安全事故。

##### 5.1.8.2 点云纠偏

对误差较大的点云可以通过采集地面控制点进行纠偏，就是使用测量型的 GNSS 接收机设备在点云覆盖的特征点位进行坐标采集，然后对比点云数据进行纠偏，纠偏到 0.2 m 的误差范围内（最

大误差不超过 0.5 m) 才能进行航线设计, 否则需要重新采集点云数据。

### 5.1.9 RTK 定位精度要求

飞机飞行周围环境复杂, 尤其是高压带电设备, 如果飞行位置有偏差, 可能会造成飞机损毁的事故, 甚至导致电力线损坏, 所以控制飞机飞行 RTK 定位设备定位精度应在 0.2 m 范围内, 即设计的航点坐标和飞机实际飞行的位置误差不超过 0.2 m, 设计的航点高度和飞机实际飞行的高度误差不超过 0.2 m。

## 5.2 作业流程

基于点云的自动驾驶作业流程主要包括以下几个步骤。

- a) 数据准备, 准备航线设计所需要的线路路径数据, 线路点云数据, 作业任务数据等;
- b) 点云精度校验, 校验点云精度, 保证点云数据的准确性和可用性;
- c) 航线设计, 根据计划开展线路自动驾驶飞行航线设计;
- d) 航线审核, 应用三维场景计算分析与人工浏览相结合的方式, 审核航线, 排除风险, 保证飞行安全;
- e) 下载当前计划航线;
- f) 飞行准备, 对作业地点进行勘察, 起降点选取, 线路通道通信障碍, 风险点, 作业设备安装和检查;
- g) 巡视飞行, 到作业场地执行自动驾驶精细化巡检任务;
- h) 数据整理, 对作业数据进行分类归档处理, 对作业结果进行分析总结, 飞行质量评估。

## 5.3 作业准备

### 5.3.1 数据准备

#### 5.3.1.1 线路路径数据

准备好线路的位置数据, 包括每一基杆塔的地理坐标, 线路路径, 线路名称, 杆塔名称和其他附加信息, 使用 KML 文件把数据进行封装, 使用中科图新地球可以打开, 查看线路沿布情况。

#### 5.3.1.2 线路点云数据

按照要求准备好符合空间精度要求、分类标准要求的点云数据, 包括整个线路通道的清晰点云, 可以清晰分辨杆塔、主要杆塔部件、地线及每相导线。杆塔周围环境(障碍物)、线路通道环境(障碍物)、交叉跨越情况等等。

#### 5.3.1.3 作业任务数据

根据机巡作业管理系统的作业任务, 明确好作业任务情况, 人员安排情况, 巡检目标情况, 作业架次, 作业范围等信息。

### 5.3.2 点云精度验证

对于已经有精度报告的线路点云数据, 直接依据精度报告评价点云精度。

对于没有精度报告的线路点云数据, 开展点云采集精度校验, 点云精度偏差较大的, 尝试对点云数据进行纠偏处理, 并重新规划航线。

原则上必须经过严格校验, 满足点云精度要求的点云数据才能作为航线设计的基础数据, 否则会直接影响作业效果, 甚至造成安全事故。

### 5.3.3 航线规划

#### 5.3.3.1 通道巡检

多旋翼无人机自动驾驶通道巡检要求无人机在杆塔及线路通道正上方，航线将按照杆塔沿布图自动生成，飞行作业时进行连续定时拍照或摄影，要求拍摄的影像可以清晰呈现线路通道内的完整情况。航向重叠率在 30%以上，影像数据要求分辨率在 1920\*1080 以上。

#### 5.3.3.2 树障巡检

树障巡检是利用多旋翼无人机（RTK 模式）自动驾驶进行可见光树障分析数据采集的操作，航线根据杆塔沿布情况进行设计，飞行位置在线路通道正上方偏左偏右的位置，航向和旁向重叠率在 60%以上，保证后期生成可见光点云的质量，达到进行树障分析的要求。

#### 5.3.3.3 精细巡检

多旋翼无人机输电线路精细化巡检的作业标准是，杆塔设备，无人机围绕杆塔设备巡视飞行；线路通道上，无人机在线路正上方巡视飞行。多旋翼无人机与线路、杆塔的最小安全距离应大于 2 m。要求使用可见光照相机、机载红外装置对线路和杆塔进行精细化巡视。

##### 5.3.3.3.1 巡检内容

多旋翼无人机巡检内容主要包括线路本体、附属设施、通道及电力保护区范围三大部分，巡检内容见附录 H 飞行中应重点关注。

##### 5.3.3.3.2 拍照对象及拍照顺序

- a) 档中导地线拍照，  
按照定时拍照，完整拍摄线路两档中间线路通道，飞行速度宜 10-15 m/s，拍照时间间隔 2 s；
- b) 杆塔设备拍照，  
悬停或缓慢通过杆塔时，按照飞行前进方向，先整体后局部、从上到下、从右往左、从前往后、从低电压端到高电压端、连续全覆盖的原则拍摄。

##### 5.3.3.3.3 照片要求

作业人员应保证所拍摄照片对象覆盖完整、清晰度良好。拍摄过程中，须尽量保证被拍摄主体处于相片中央位置，所占尺寸为相机取景框的 60%以上，且处于清晰对焦状态，保证销钉级元件清晰可见。

条件允许时，拍摄完应立即回看拍摄照片质量，如有对焦不准、曝光不足或过曝等质量问题，应立即重新拍摄。

##### 5.3.3.3.4 航线设计

根据输电线路巡检作业标准，结合自动驾驶相关技术规范制定了自动驾驶巡检航线设计标准，具体标准如下：

- a) 塔内航线设计：
  - 1) 入塔点  
进入杆塔的航点，默认在杆塔上方 10 m 位置，如果进入杆塔的飞行通道中有障碍物，需要根据障碍物高度提高入塔点高度；
  - 2) 中心校验点

杆塔正上方 10 m 处，飞机朝向垂直于横担方向，镜头 90 度垂直向下拍摄，用于校验飞机 RTK 定位位置是否准确。如果两塔中间没有交叉跨越或障碍物，不需要抬高航线高度，则入塔点就是中心校验点；

### 3) 拍照点

对杆塔的主要部件进行拍摄，拍摄部件参见附录 0。验证航线一般距杆塔设备 6 m，实际作业距杆塔设备 3—5 m，根据拍摄杆塔电压等级和拍摄目标大小而定，保证拍摄目标长度或宽度占取景框的 60% 以上，为了避免阳光的影响，拍摄角度为斜向下 30 度对准拍摄目标；

### 4) 出塔点

出塔点是飞机巡检完杆塔后退出杆塔的点，默认位置在最后一个拍照点向上，距离杆塔高度 10 m 处，如果到下一个航点的飞行通道中有障碍物，需要根据障碍物高度，提高出塔点高度；

### 5) 辅助点

在塔内航线，如果在两个拍照点间直线飞行危险性比较大，甚至导致碰撞杆塔或导线时，就需要增加辅助点，辅助点需要根据实际情况酌情添加。

## b) 塔间航线设计：

塔间航线默认按照两塔上方 10 m 位置直线飞行，中途每隔 50 m 进行拍照，相机角度斜向下 23 度，如果飞行通道内有交叉跨越和障碍物情况，需要根据障碍物高度提高飞行高度跨越飞行。

## c) 起飞点至起始杆塔航线设计：

起飞点到起始杆塔的高度需要根据现场实际情况进行设定，原则是跨越飞行通道内的障碍物。

## d) 终点塔至降落点航线设计：

终点塔至降落点的高度需要根据现场实际情况进行设定，原则是跨越飞行通道内的障碍物。

## e) 航线三维查看审核：

航线设计好后需要对航线进行三维审核预览，包括整个线路通道的完整航线和每一基塔的塔内航线，保证每一个拍照点符合安全和高效的原则。

## 5.4 现场作业

### 5.4.1 起降点选取

多旋翼无人机自动驾驶作业需要合适的起降点，保证无人机的作业安全和作业效率，起降点需要选择开阔地带，地面平整，半径 10 m 内没有遮挡物，保证遥控器和作业目标之间没有任何遮挡物，如果作业环境不理想，需要更换场地。

### 5.4.2 地面基站布设

多旋翼无人机自动驾驶精细化巡检需要使用搭载 RTK 精准定位的无人机进行作业，作业前需要架设地面基站，保证无人机可以接收精确的坐标信息，地面站架设周围没有高过基站的遮挡物，保证基站可以接收到稳定的卫星信号，基站架设好后需要对基站坐标进行校验，对不准确的基站坐标需要进行纠正。

### 5.4.3 巡检飞行

#### 5.4.3.1 作业准备

安装好作业设备，检查设备状态，一切正常后可以开启起飞作业，起飞前需通过作业终端 APP 或电脑端作业软件，查看并校核作业线路，航线信息，明确安全提示。

#### 5.4.3.2 作业监视

每一条线路的首次飞行需要验证航线的准确性，通过观察图传上飞机的实际位置与航线设计中飞机的位置进行对比，得知航线是否有偏差，如果偏差较大应立即终止任务，调整航线后再次展开作业。

作业中需要实时关注飞机状态，发现异常应立即终止任务，手动返航。如果飞行过程中信号卡顿严重，应适当调整遥控器和天线的高度、位置和朝向，如果问题得不到解决，应立即终止任务。

飞行作业宜配置两人，观察员与无人机操作员。观察员负责观察飞机状况，无人机操作员负责遥控操作，通过图传监视飞机任务执行情况，如果飞机的飞行位置和高度与设计的位置和高度出现影响安全作业的较大偏差，应立即终止任务，实际飞行中如果 RTK 信号连续丢失，应该立即终止任务。

#### 5.4.4 质量检查

作业完成后应在现场对作业质量进行检查，看有无拍漏，拍错的照片，或质量不佳的照片，如果存在不满足作业要求的照片需要重新执行任务。

### 5.5 数据处理

#### 5.5.1 通道巡检数据整理

通道巡检数据应按照作业日期→线路名称→杆塔编号逐级进行影像数据归档，照片数据需要使用专业处理软件进行通道全景影像拼接，并把拼接好的图像进行保存。

#### 5.5.2 树障巡检数据整理

树障巡检数据应按照作业日期→线路名称→杆塔编号逐级进行数据归档，归档完成后使用专业的处理软件处理照片生成可见光点云数据，并进行保存，方便之后进行树障分析。

#### 5.5.3 精细巡检数据整理

精细巡检数据应按照作业日期→线路名称→杆塔编号→杆塔部件名称逐级进行数据归档，方便以后的查阅和使用。

#### 5.5.4 数据安全

电网数据安全需要得到很好的保障，作业完成后应妥善回收并收纳好相机内存卡，防止内存卡丢失，严禁把内存卡交给作业人员以外的无关人员。回来后应及时对数据进行归档分类处理，确认归档完成后应及时清理相机内存卡里的数据，方便下次使用，避免数据混乱，进行数据处理的计算机必须安全可靠，按照规定安装防病毒软件，数据操作人员必须遵守公司保密协议及相关操作规定，严防数据泄露，为了避免数据丢失，应定期对数据进行查看和备份。

#### 5.5.5 作业质量评价

作业完成后应根据作业数据进行作业质量评价，使用专业软件分析照片中拍摄目标在图像中的占比是否达到要求，图像是否清晰，是否存在过曝或虚焦的情况，对同一目标的历史照片进行横向对比，得到照片差异，分析拍照精度，综合评价结论便于后期不断优化飞行航线和拍照策。

附录 A  
(资料性)  
点云分类表

表 A.1 为点云分类表。

表 A.1 点云分类表

序号	中文名称	英文名称	注释
1	默认点	Default	未分类的点云
2	地面点	Ground	地面点, 用来反映地形起伏的点
3	低植被	Low_vegetation	0-2 米, 地面上 0-2 米地物
4	中植被	Mid_vegetation	2—5 米
5	高植被	High_vegetation	5 米以上
6	建筑物	Building	
7	低点(噪声)	Noise	孤立点、噪声点
8	关键点	Mkp_ground	用来制作 DOM 的点
9	临时建筑物	Temporary_building	包括临时建筑物、蔬菜大棚、在建建筑物、柴草堆和木头堆等
10	桥梁	Bridges	
11	铁路	Railway	包括各种铁路路面及铁轨点
12	公路	Road	水泥或沥青路面且宽度大于 3.5 米
13	不通航河流	Unnavigable_rives	不可以行驶货船的河流
14	湖泊	Lake	
15	变电站	Substations	变电站包括围墙内所有设施, 不包括电力线和地面
16	导线	Conductor	包括同塔并架的线路
17	铁塔	Structures	被测输电线路的杆塔
18	交叉跨越 1(上)	Scissors_crossing(up)	高于导线
19	交叉跨越 2(下)	Scissors_crossing(down)	低于导线
20	地线(光缆线)	Shield_wire	
21	其他	Other	道路的指示牌、标识牌、建筑物围墙
22	船舶/汽车	Ship& Car	能够分辨清楚的船舶和汽车
23	其他线路	Other_line	与线路无交跨的其他线路

表 A.1 点云分类表（续）

24	通航河流	Navigable_rives	可以行驶货船的河流
25	建在下面的线路	Underbuild_conductor	与主线路共塔的其他线路
26	铁路承力索及接触线	Carrier cable & line	铁路承力索、接触线及撑杆
27	绝缘子	Insulator	

## 附录 B

(资料性)

## 不同塔型拍摄内容

表 B.1 为直线型杆塔需拍摄内容。

表 B.2 为耐张型杆塔需拍摄内容。

表 B.1 直线塔拍摄内容

拍摄部位		拍摄重点
直线塔	塔概况	塔全貌、塔头、塔身、杆号牌、塔基
	绝缘子串	绝缘子
	悬垂绝缘子横担端	绝缘子碗头销、保护金具、铁塔挂点金具
	悬垂绝缘子导线端	导线线夹、各挂板、联板等金具、碗头挂板销
	地线悬垂金具	地线线夹、接地引下线连接金具、挂板
	通道	小号侧通道、大号侧通道

表 B.2 耐张塔拍摄内容

拍摄部位		拍摄重点
耐张塔	塔概况	塔全貌、塔头、塔身、杆号牌、塔基
	耐张绝缘子横担端	调整板、挂板等金具
	耐张绝缘子导线端	导线耐张线夹、各挂板、联板、防振锤等金具
	耐张绝缘子串	每片绝缘子表面及连接情况
	地线耐张（直线金具）金具	地线耐张线夹、接地引下线连接金具、防振锤、挂板
	引流线绝缘子横担端	绝缘子碗头销、铁塔挂点金具
	引流绝缘子导线端	碗头挂板销、引流线夹、联板、重锤等金具
	引流线	引流线、引流线绝缘子、间隔棒
通道	小号侧通道、大号侧通道	

附录 C  
(资料性)  
不同塔型巡检路径

以下为不同塔型巡检路径。

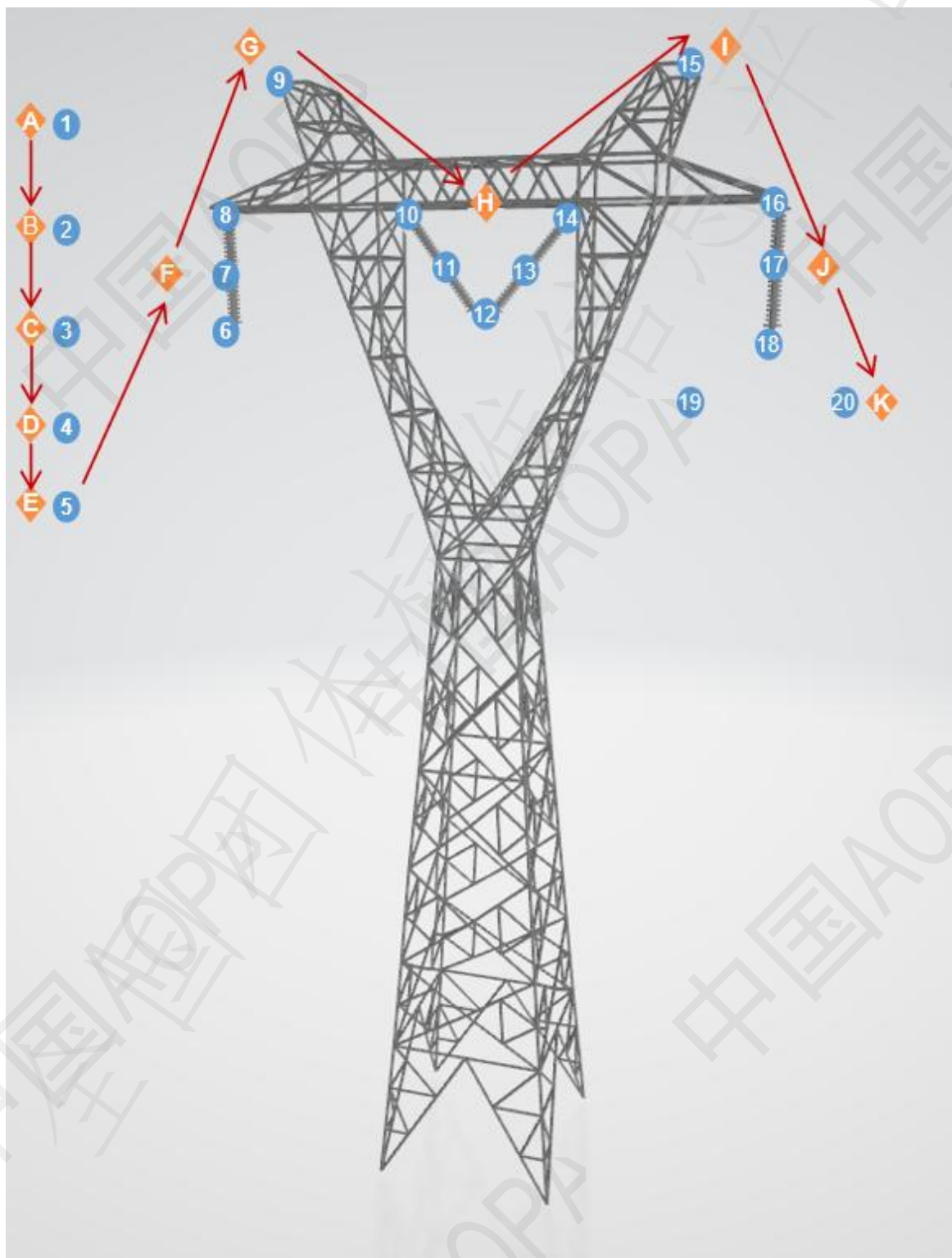


图 C.1 交流线路单回直线酒杯塔

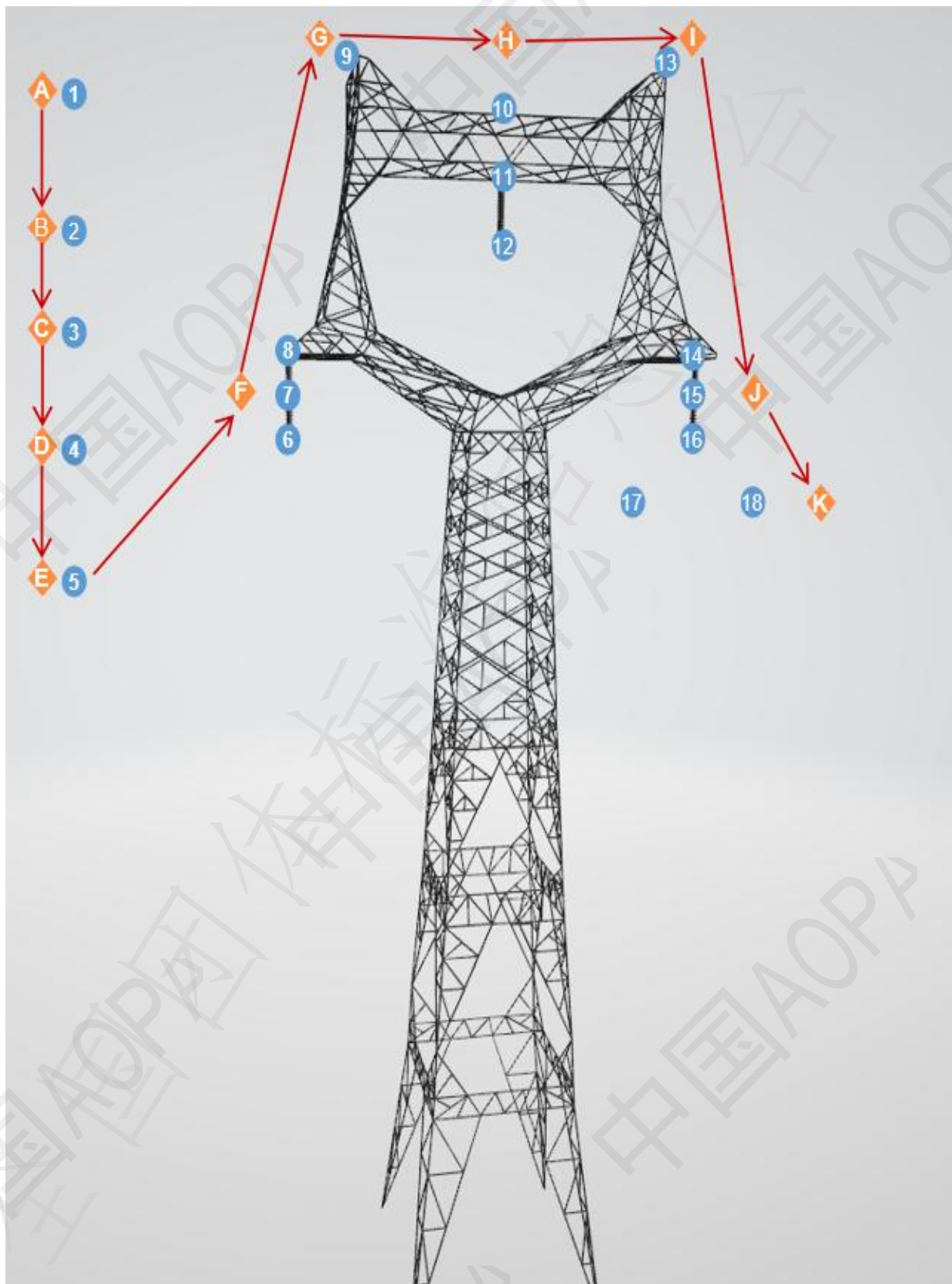


图 C.2 交流线路单回直线猫头塔

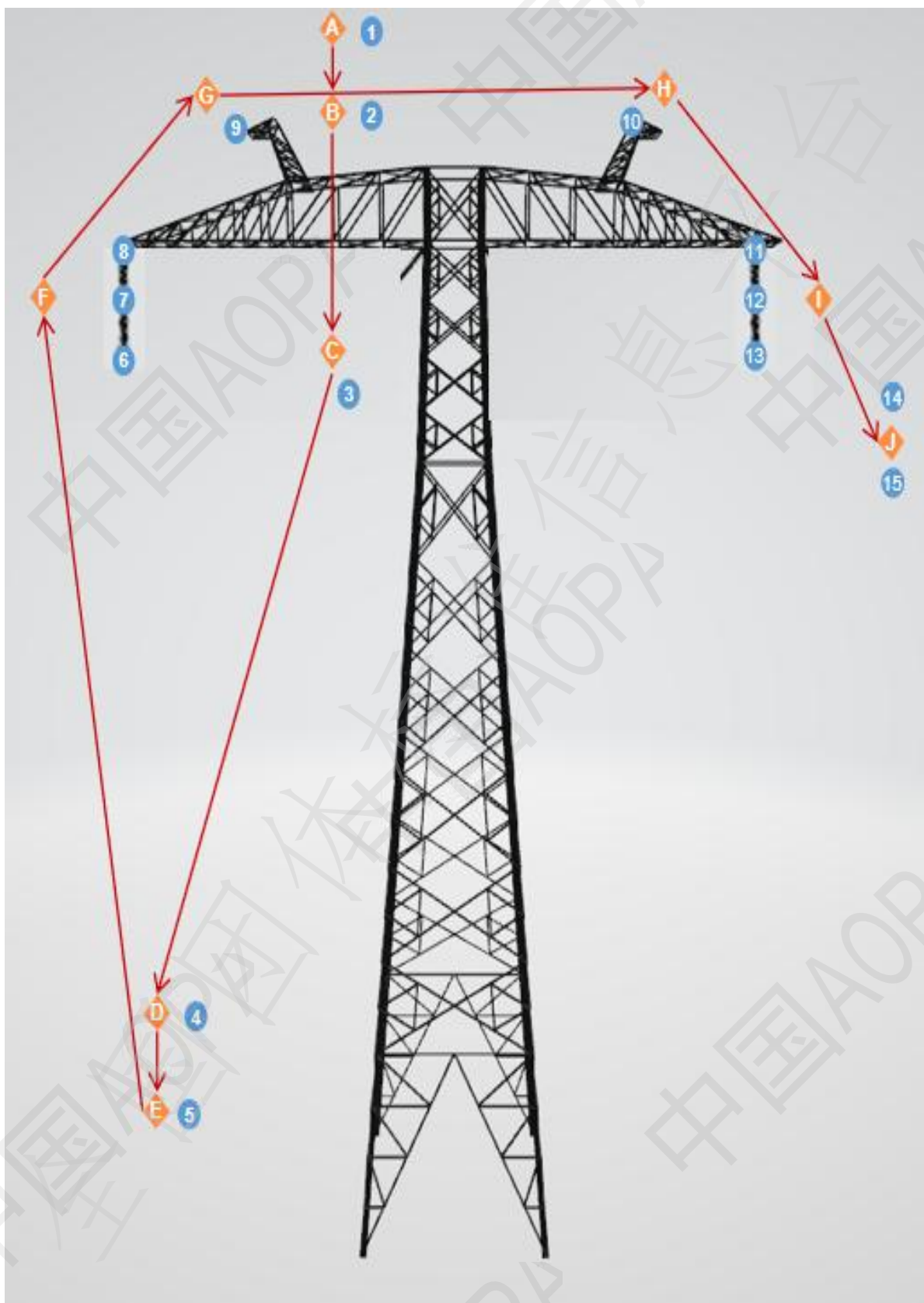


图 C.3 直流线路单回直线塔

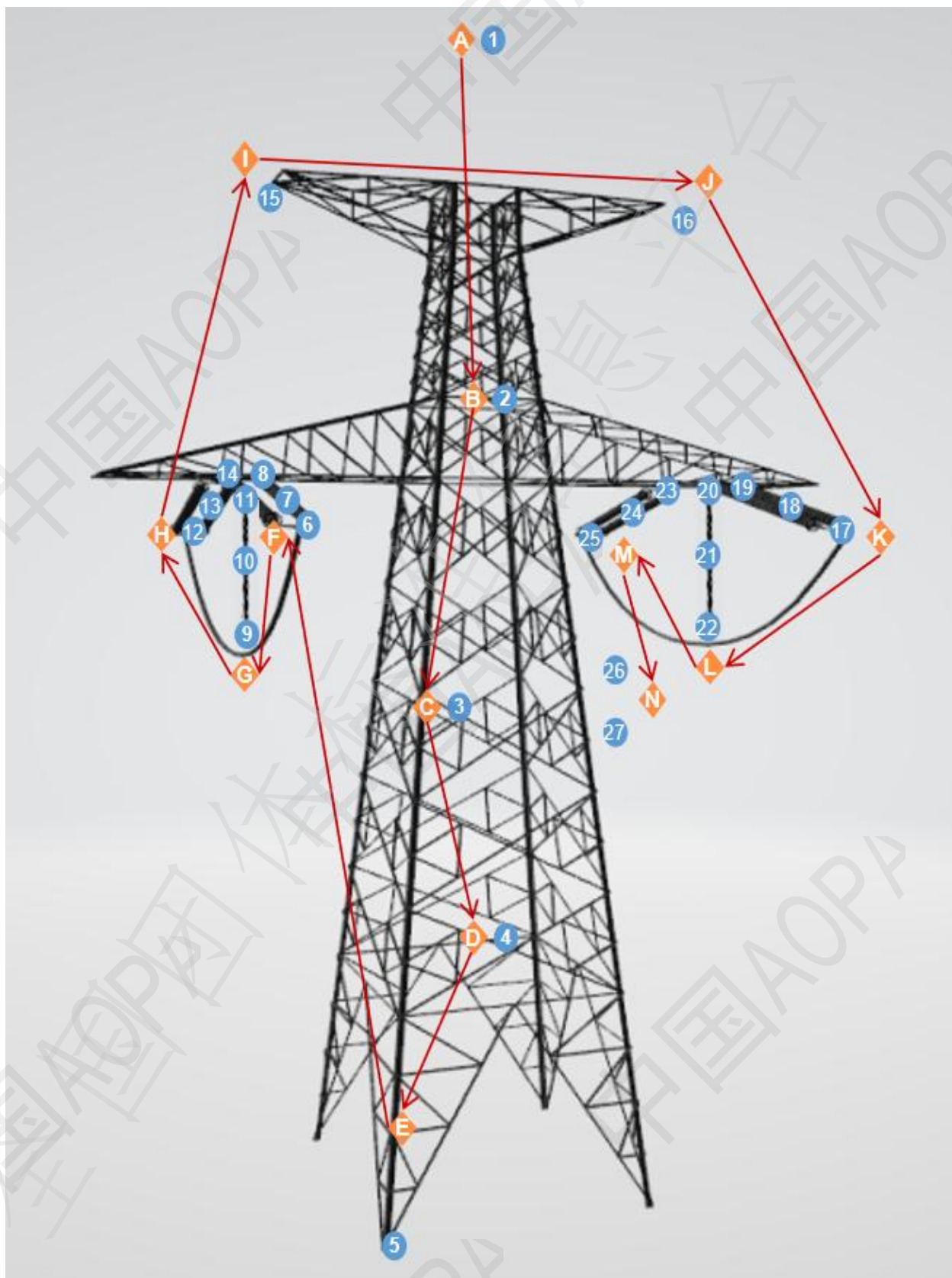


图 C.4 直流线路单回耐张塔

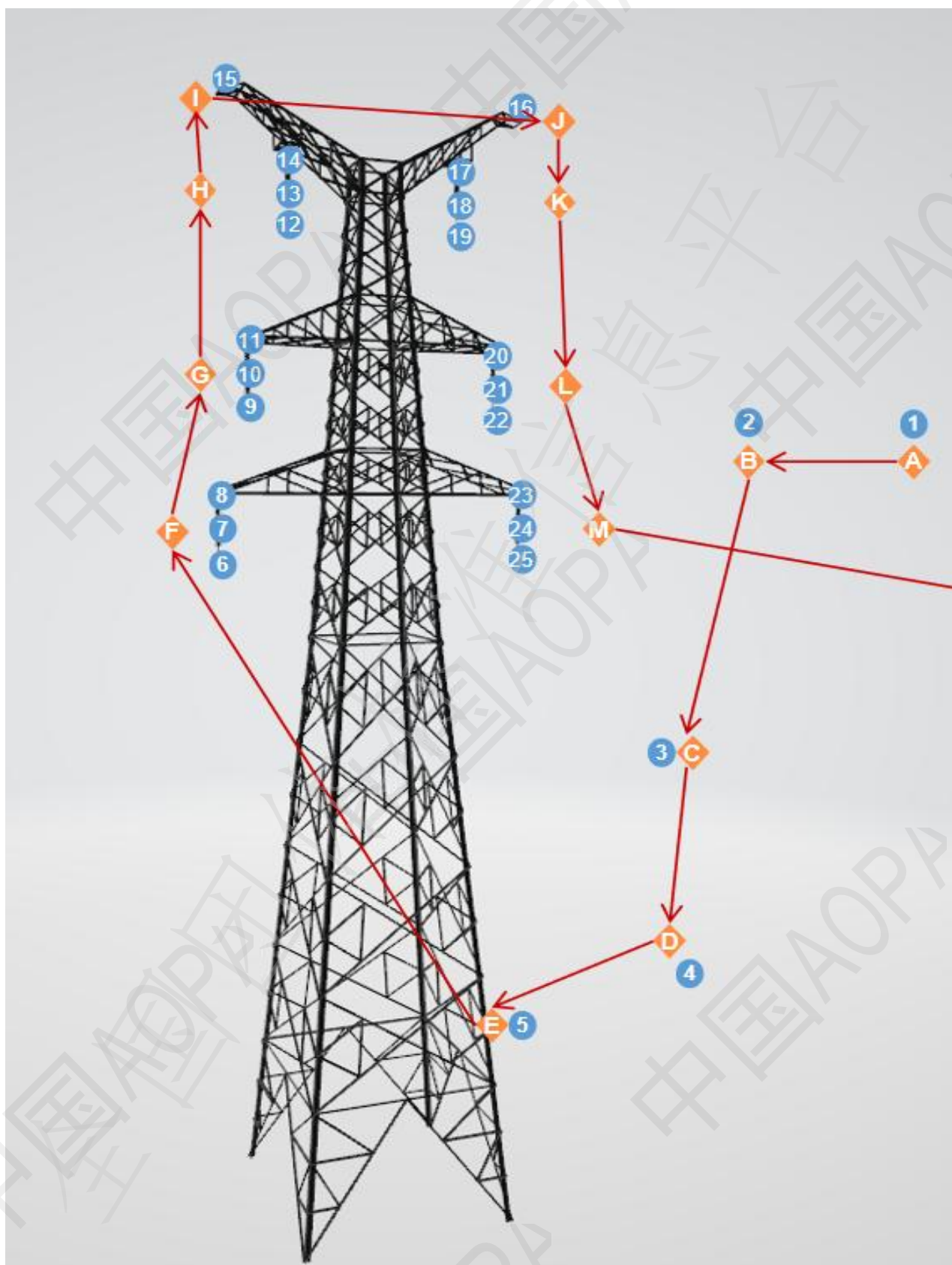


图 C.5 交流线路双回直线塔

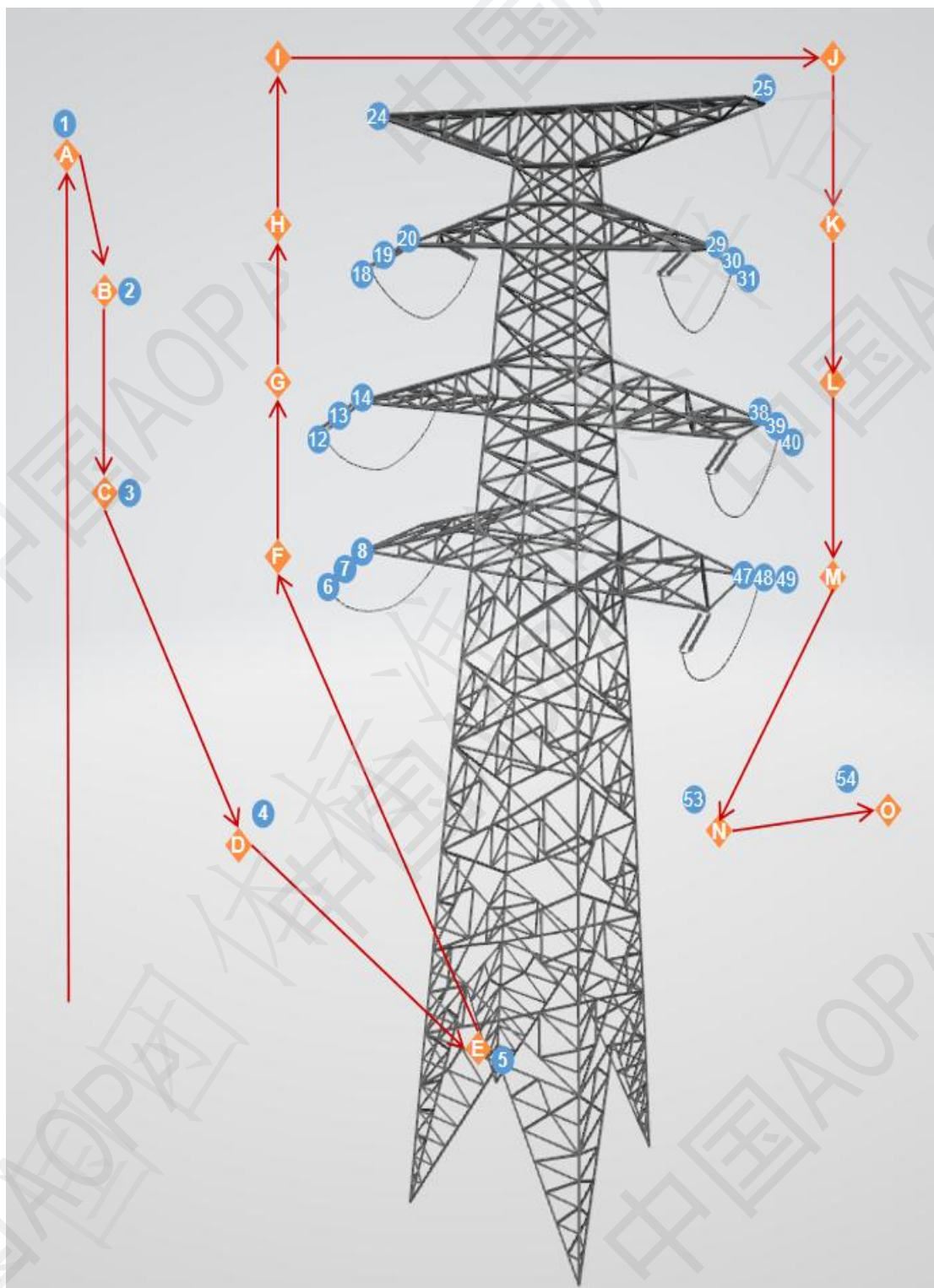


图 C.6 交流线路双回耐张塔

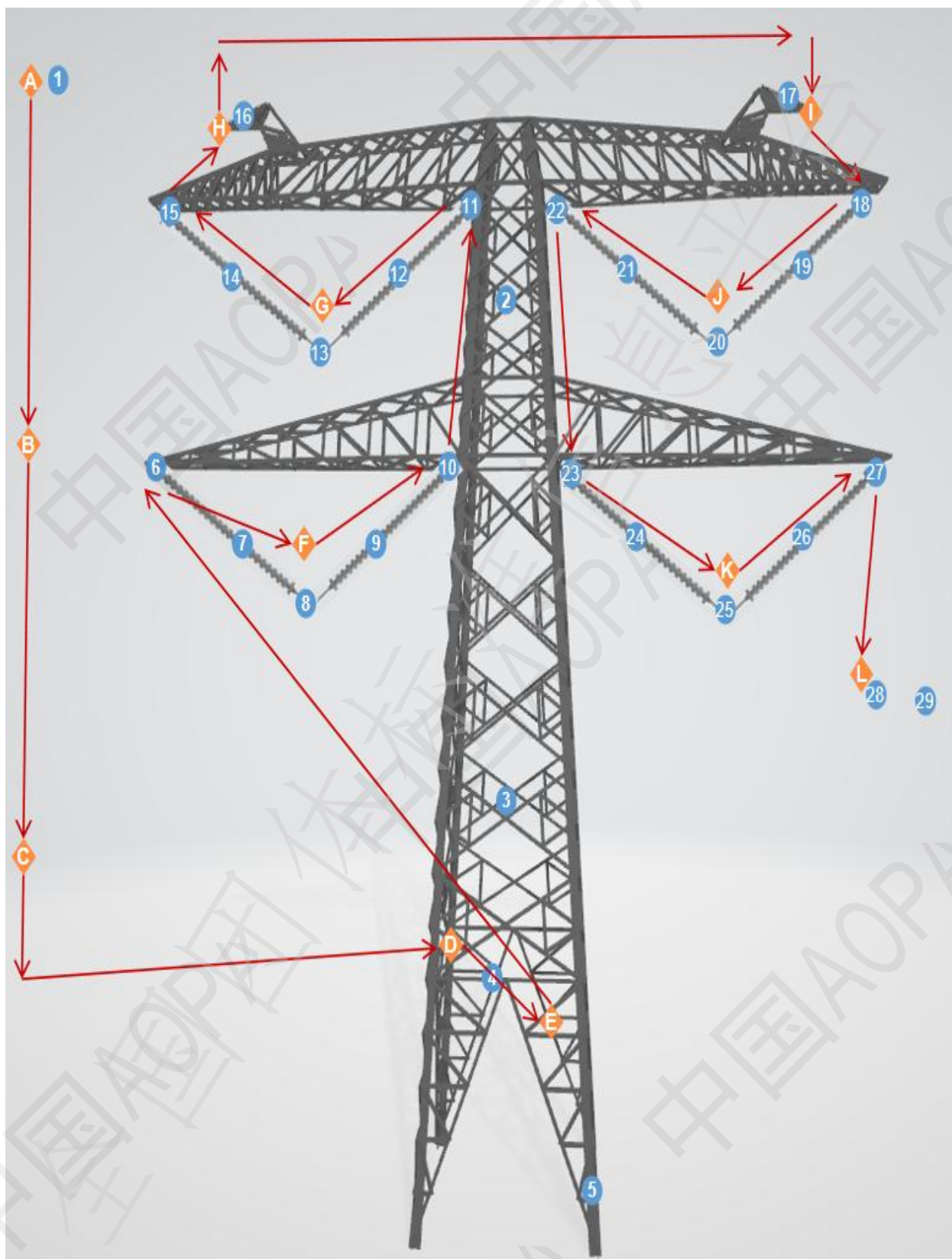


图 C.7 直流线路双回直线塔

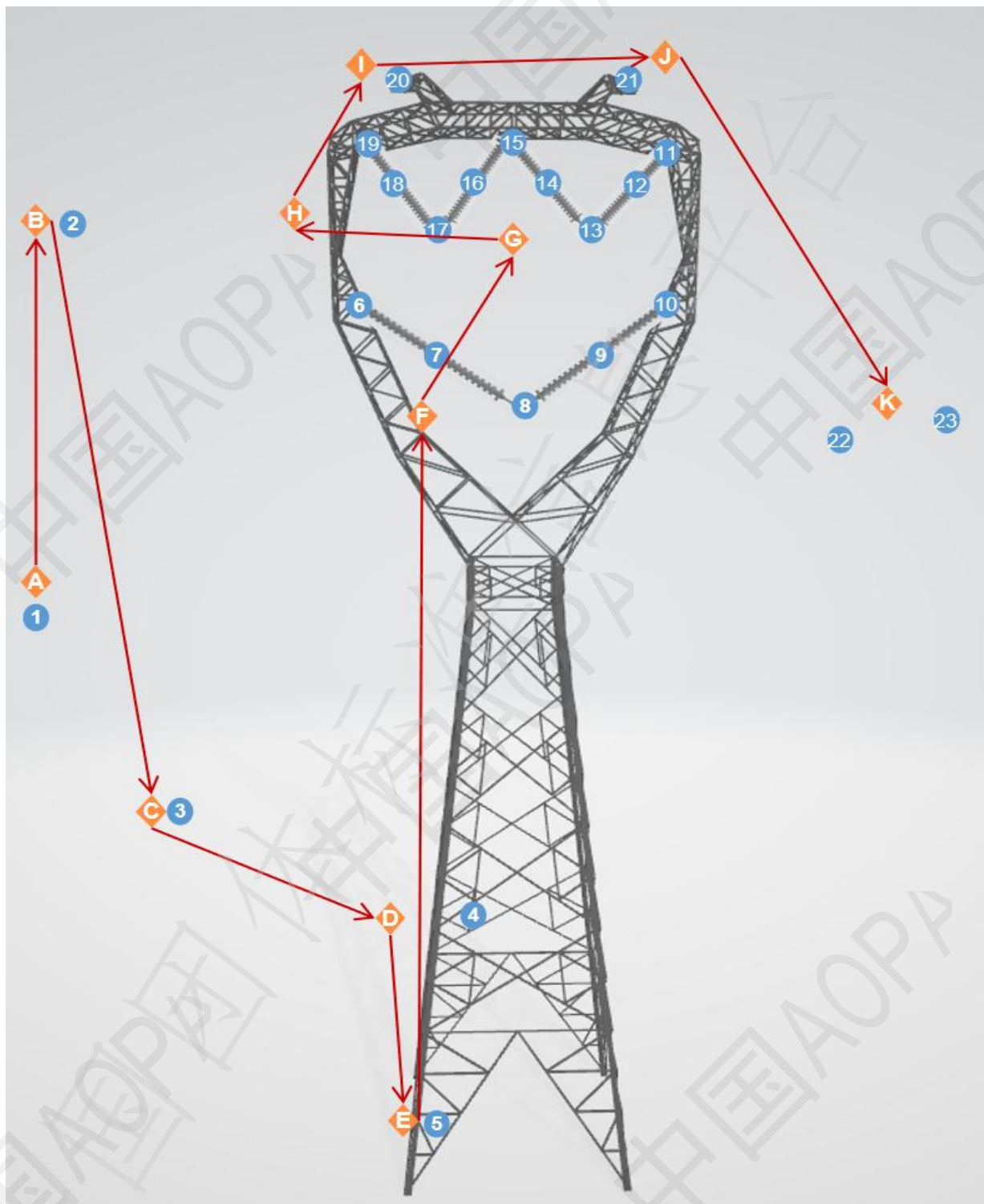


图 C.8 紧凑型塔巡检路径

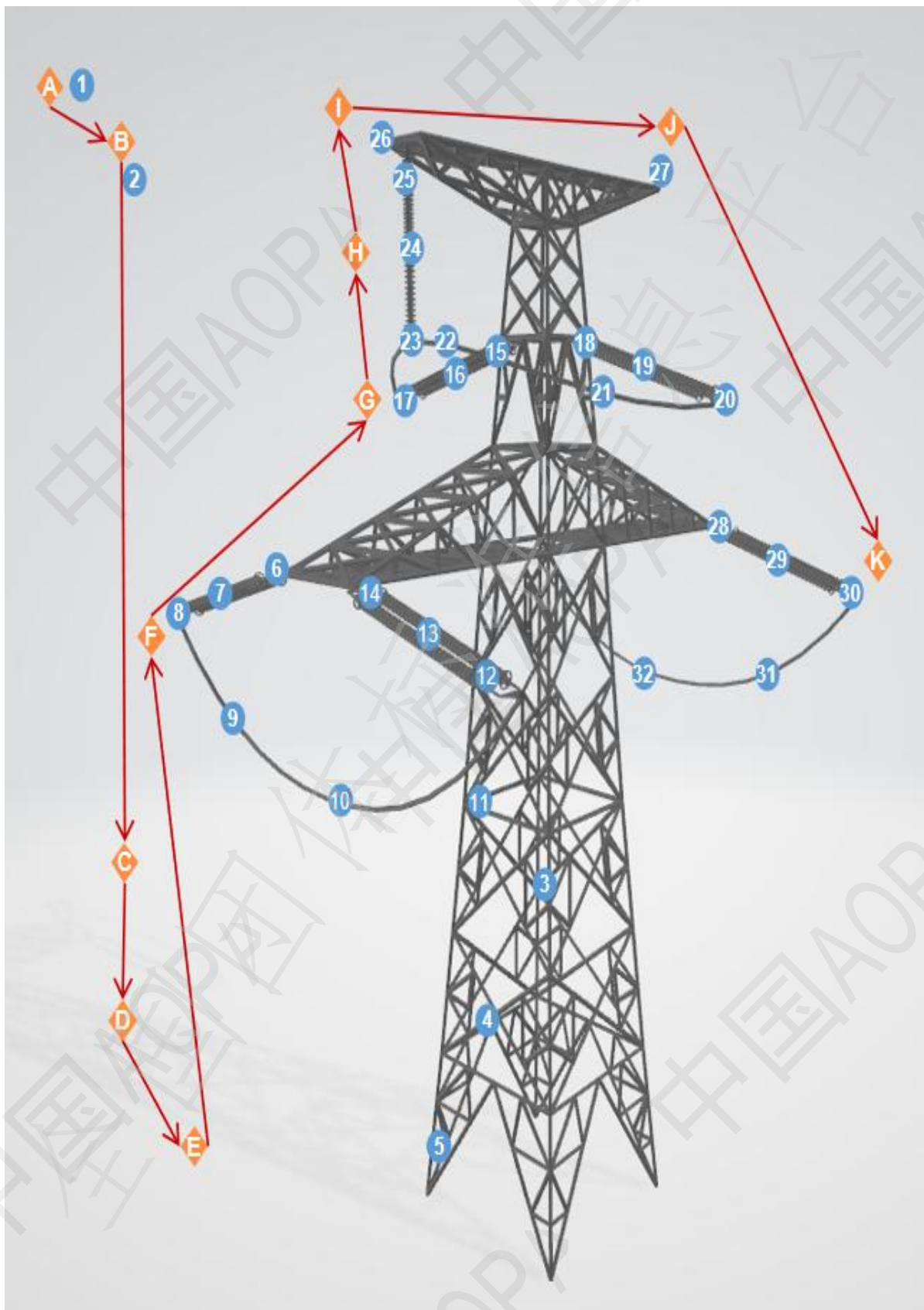


图 C.9 交流线路单回耐张干字塔

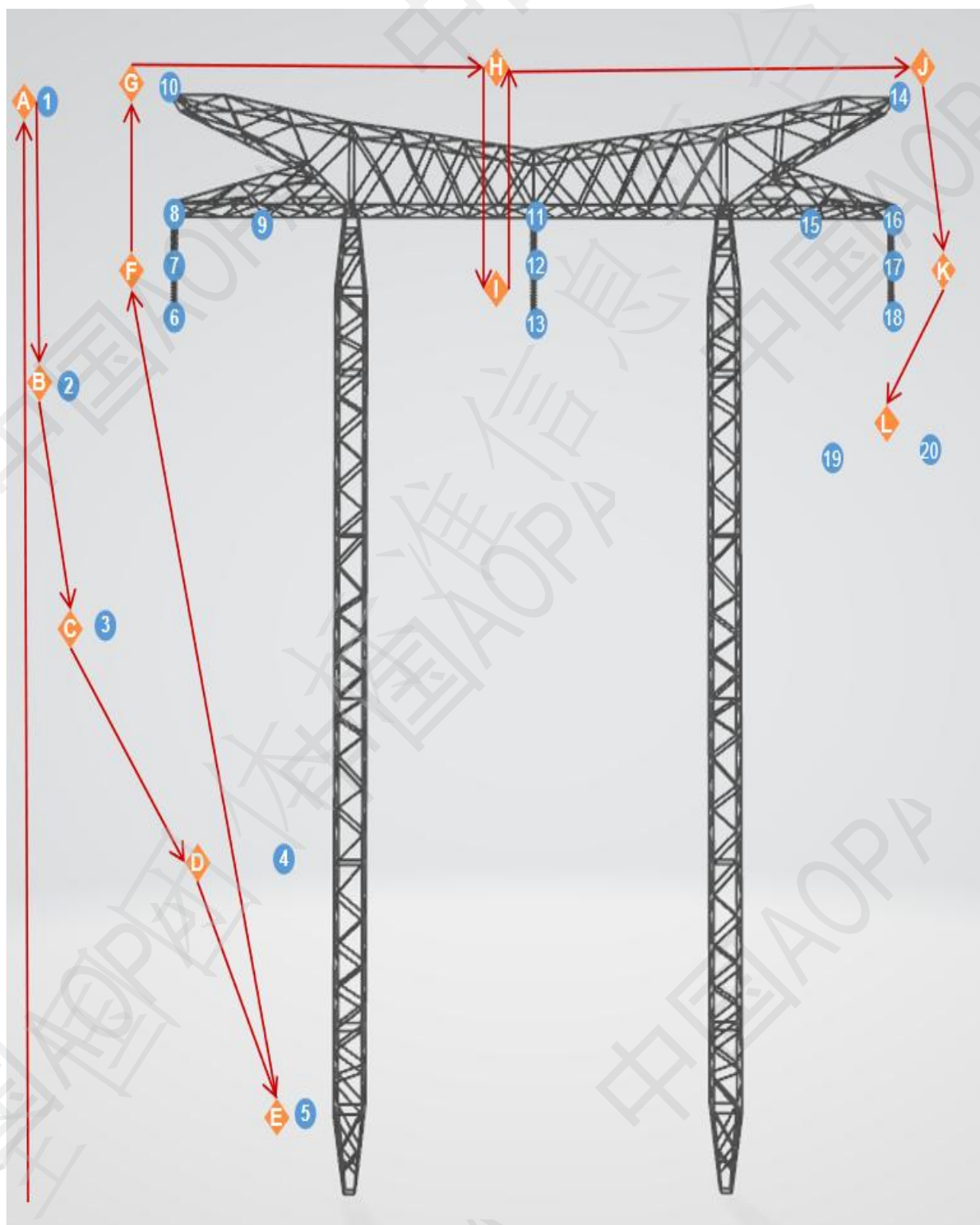


图 C.10 拉线塔巡检路径

## 附录 D

(规范性)

## 无人机作业安全检查表

表 D.1 为巡检前无人机相关设备检查内容

表 D.1 无人机作业安全检查表

序号	检查项目	检查内容	检查结果
1	扫描仪设备	巡检设备安装、接线和调试良好。	确认 ( )
2	相机	相机电量充裕,内存卡容量充裕,镜头聚焦、变焦功能正常。	确认 ( )
3	电池	无人机电池、设备电池、基站电池等供电设备电量充足	确认 ( )
4	地面站	地面站工作正常	确认 ( )
时间:            年 月 日			检查人:

附 录 E  
(规范性)  
无人机现场作业记录表

表 E.1 为无人机现场作业规情况记录表。

表 E.1 无人机现场作业记录表

作业名称			日期			天气	
作业/记录人员			设备开机时间			设备关机时间	
无人机飞行	架次	任务	飞行时间	飞行情况			
激光扫描	架次	线路	巡视区段	长度 (km)			
起降点							

附录 F  
(资料性)

## 无人机三维激光扫描资料移交清单

表 F.1 为无人机三维激光扫描完成后移交内容。

表 F.1 无人机三维激光扫描资料移交清单

编号	项目	存储方式	备注
1	原始数据	电子版	
2	解算后 POS、点云数据	电子版	
3	项目总结报告	纸质	

附录 G  
(规范性)  
数据质量检查表

表 G.1 为无人机现作业质量检查表

表 G.1 数据质量检查表

作业名称		
扫描区情况介绍		
POS 数据	卫星数量	
	姿态分离值	
	位置分离值	
	数据覆盖度	
	PDOP 值	
激光数据		
激光需补飞的部分		
备注		

附录 H  
(资料性)  
无人机巡视内容

表 H.1 为无人机巡视具体内容

表 H.1 无人机巡视内容

线路本体	地基与基面	回填土下沉或缺土、水淹、冻胀、堆积杂物等	可见光
	杆塔基础	明显破损、酥松、裂纹、露筋等，基础移位、边坡保护不够等	
	杆塔	杆塔倾斜、塔材变形、严重锈蚀，塔材、螺栓、脚钉缺失、土埋塔脚等；混凝土杆未封杆顶、破损、裂纹、爬梯变形等	
	接地装置	断裂、严重锈蚀、螺栓松脱、接地体外露、缺失，连接部位有雷电烧痕等	
	拉线及基础	拉线金具等被拆卸、拉线棒严重锈蚀或蚀损、拉线松弛、断股、严重锈蚀、基础回填土下沉或缺土等	
	绝缘子	伞裙破损、严重污秽、有放电痕迹、弹簧销缺损、钢帽裂纹、断裂、钢脚严重锈蚀或蚀损、绝缘子严重倾斜、绝缘子温度异常	可见光、红外、（紫外）
	导线、地线、引流线、OPGW	散股、断股、损伤、断线、放电烧伤、导线接头部位过热、悬挂漂浮物、弧垂过大或过小、严重锈蚀、有电晕现象、导线缠绕（混线）、覆冰、舞动、风偏过大、对交叉跨越物距离不够等	
线路金具	线夹断裂、裂纹、磨损、销钉脱落或严重锈蚀、发热；均压环、屏蔽环烧伤、螺栓松动、发热；防振锤跑位、脱落、严重锈蚀、阻尼线变形、烧伤；间隔棒松脱、变形或离位、悬挂异物；各种连板、连接环、调整板损伤、裂纹、发热等		
附属设施	防雷装置	避雷器动作异常、计数器失效、破损、变形，引线松脱；放电间隙变化、烧伤等	可见光
	防鸟装置	固定式：破损、变形、螺栓松脱等；	
		活动式：动作失灵、褪色、破损等；	
		电子、光波、声响式：损坏	
	各种监测装置	缺失、损坏	
	航空警示器材	高塔警示灯、跨江线彩球等缺失、损坏、失灵	
	防雾防冰装置	缺失、损坏等	
ADSS 光缆	损坏、断裂、弛度变化等		
杆号、警告、防护、指示、相位等标志	缺失、损坏、字迹或颜色不清、严重锈蚀等		

表 H.1 无人机巡视内容（续）

通道及电力保护区（外部环境）	建（构）筑物	有违章建筑，导线与建（构）筑物安全距离不足等	可见光、激光
	树木（竹林）	有新栽树（竹），导线与之安全距离不足等	
	施工作业	线路下方或附近有危及线路安全的施工作业等	
	火灾	线路附近有燃放烟火，有易燃、易爆物堆积等	
	交叉跨越变化	出现新建或改建电力、通信线路、道路、铁路、索道、管道等	
	防洪、排水、基础保护设施	大面积坍塌、淤堵、破损等	
	自然灾害	地震、冰灾、山洪、泥石流、山体滑坡等引起通道环境变化	
	道路、桥梁	巡线道、桥梁损坏等	
	污染源	出现新的污染源或污染加重等	
	采动影响区	出现新的采动影响区、采动区出现裂缝、塌陷对线路影响等	
其他	线路附近有人放风筝、有危及线路安全的漂浮物、采石（开矿）、射击打靶、藤蔓类植物攀附杆塔		

附录 I  
(资料性)  
自动驾驶作业记录表

表 I.1 为无人机自动巡视情况记录。

表 I.1 自动驾驶作业记录表

编号:		巡检时间: 年 月 日			
巡检线路					
任务类型	<input type="checkbox"/> 通道巡检 <input type="checkbox"/> 树障巡检 <input type="checkbox"/> 精细巡检				
使用机型		天气		气温	
负责人		飞手		架次	
设备检查					
航线信息					
备注					
记录人:		工作负责人			
a 此栏记录无人机设备检查中发现的异常情况, 飞行中飞行平台、任务系统等异常状况及航后检查情况。					
b 此栏记录飞行中航线信息, 包括起降点、航迹周边环境等的变化等。					

附录 J  
(资料性)  
数据归档目录规范

以下为无人机巡检数据存储各级文件(夹)命名规范。

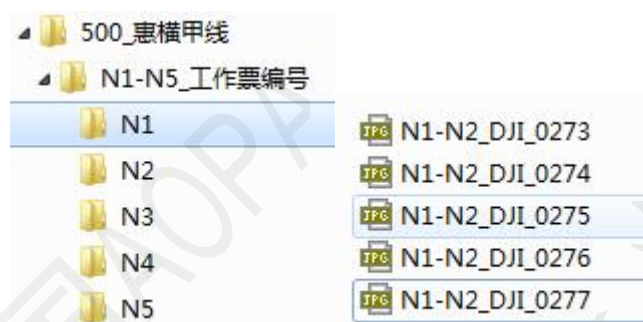


图 J.1 通道巡检

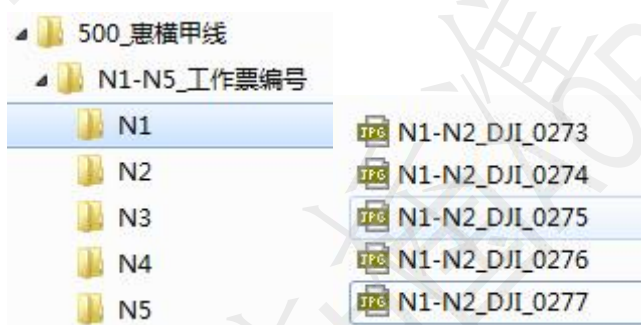


图 J.2 树障巡检



图 J.3 精细巡检

附录 K  
(资料性)  
数据文件命名规则

### K.1 通道巡检

#### K.1.1 通道巡检图像文件

通道巡检图像文件以每一档为单位命名，规则为“杆塔编号（小号）—杆塔编号（大号）\_图像文件名.jpg”。

#### K.1.2 通道巡检视频文件

通道巡检视频文件以每一档为单位命名，规则为“杆塔编号（小号）—杆塔编号（大号）\_视频文件名.mp4”。

### K.2 树障巡检

树障巡检图像文件以每一档为单位命名，规则为“杆塔编号（小号）—杆塔编号（大号）\_图像文件名.jpg”。

### K.3 精细化巡检

#### K.3.1 精细化巡检图像

设备精细化巡检图像文件以每一级杆塔为单位命名，命名包含杆塔编号、杆塔部位，规则为“杆塔编号\_杆塔部位\_图像文件名.jpg”。杆塔部位命名规范参见附录 K。

#### K.3.2 精细化巡检视频

设备精细化巡检视频文件以每一级杆塔为单位命名，规则为“杆塔编号\_视频文件名.jpg”。

附录 L  
(资料性)  
不同塔型拍摄要求

以下为各电压等级不同类型杆塔巡检拍摄张数要求。

表 L.1 500 kV 及以上等级单回直线塔拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄, 角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	右相绝缘子横担连接处	1 张	镜头从上向下拍, 含线夹、防振锤
4	右相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
5	中相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
6	中相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
7	左地线线夹	1 张	含防振锤
8	左相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
9	左相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
10	线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
11	杆塔塔基	1 张	

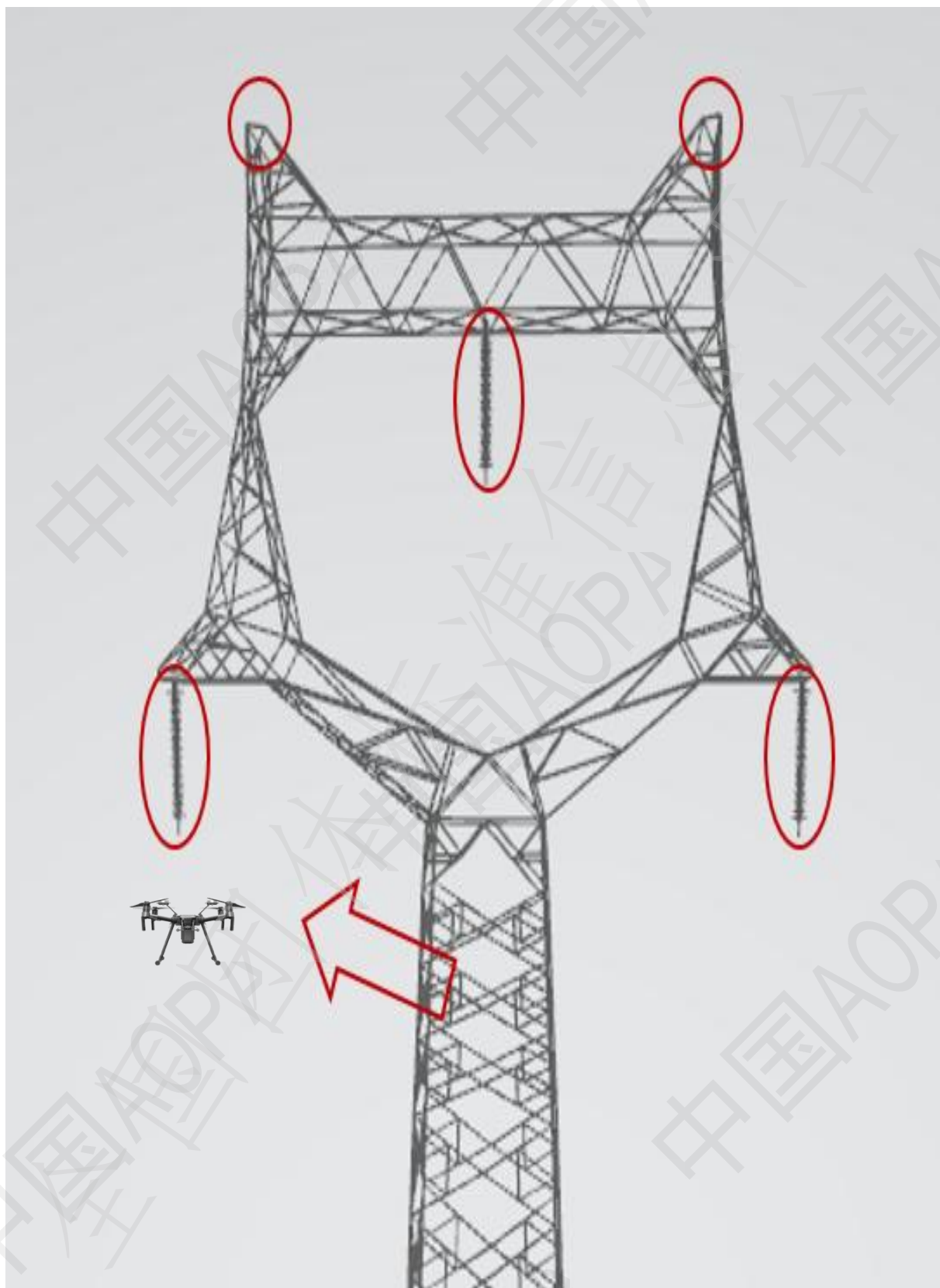


图 L.1 500 kV 及以上单回直线塔拍摄顺序

表 L.2 220 kV 及以下拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄，角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	右相绝缘子	1 张	镜头从上向下拍，含线夹、防振锤
4	中相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
5	左地线线夹	1 张	含防振锤
6	左相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
7	线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
8	杆塔塔基	1 张	

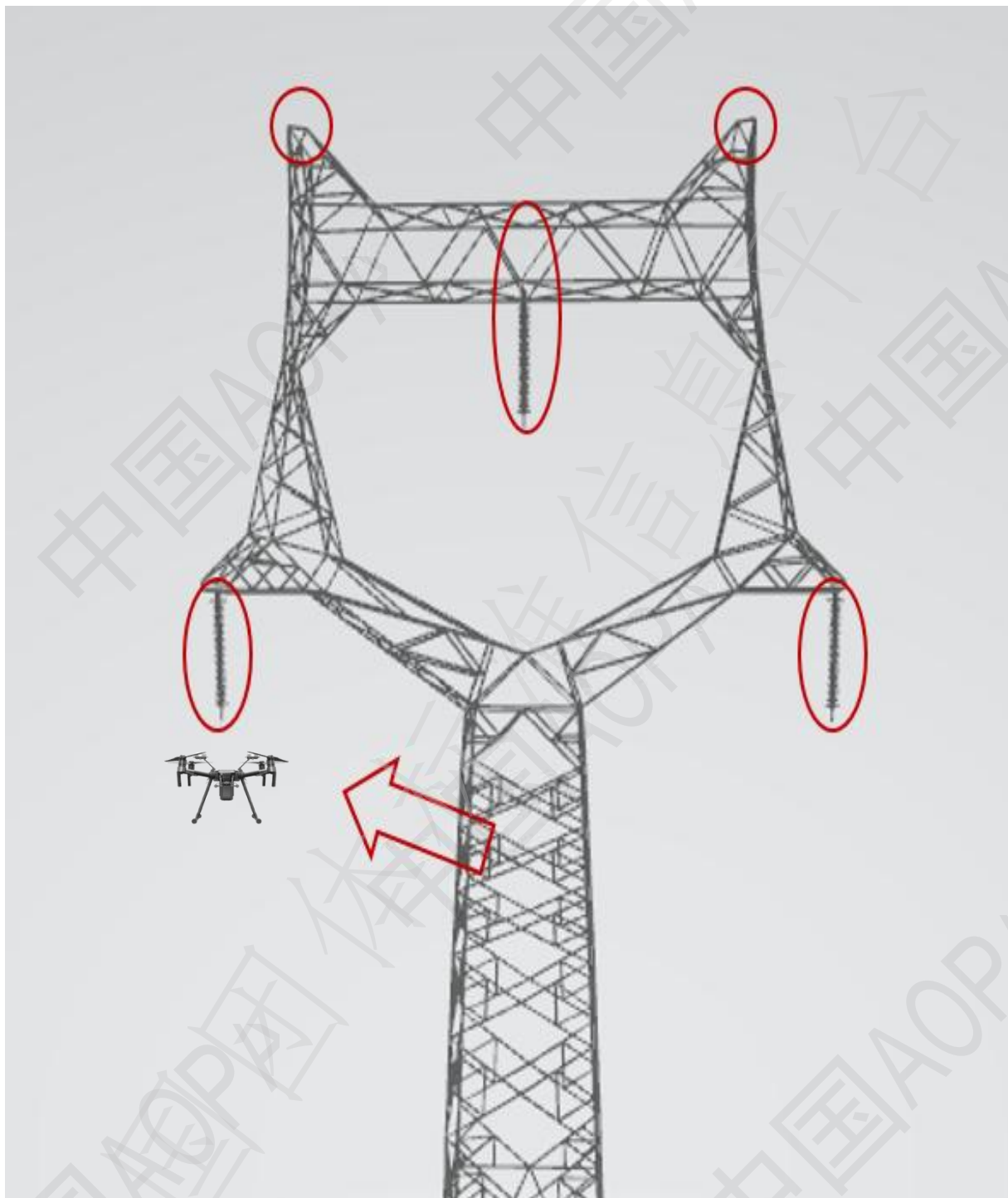


图 L.2 220 kV 及以下单回直线塔拍摄顺序

表 L.3 500 kV 及以上等级单回耐张塔拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄，角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	中相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
4	中相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
5	中相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
6	中相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
7	中相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
8	中相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
9	右相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
10	右相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
11	右相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
12	右相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
13	右相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
14	右相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
15	左地线线夹	1 张	含防振锤
16	左相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
17	左相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
18	左相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
19	左相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
20	左相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
21	左相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
22	线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
23	杆塔塔基	1 张	

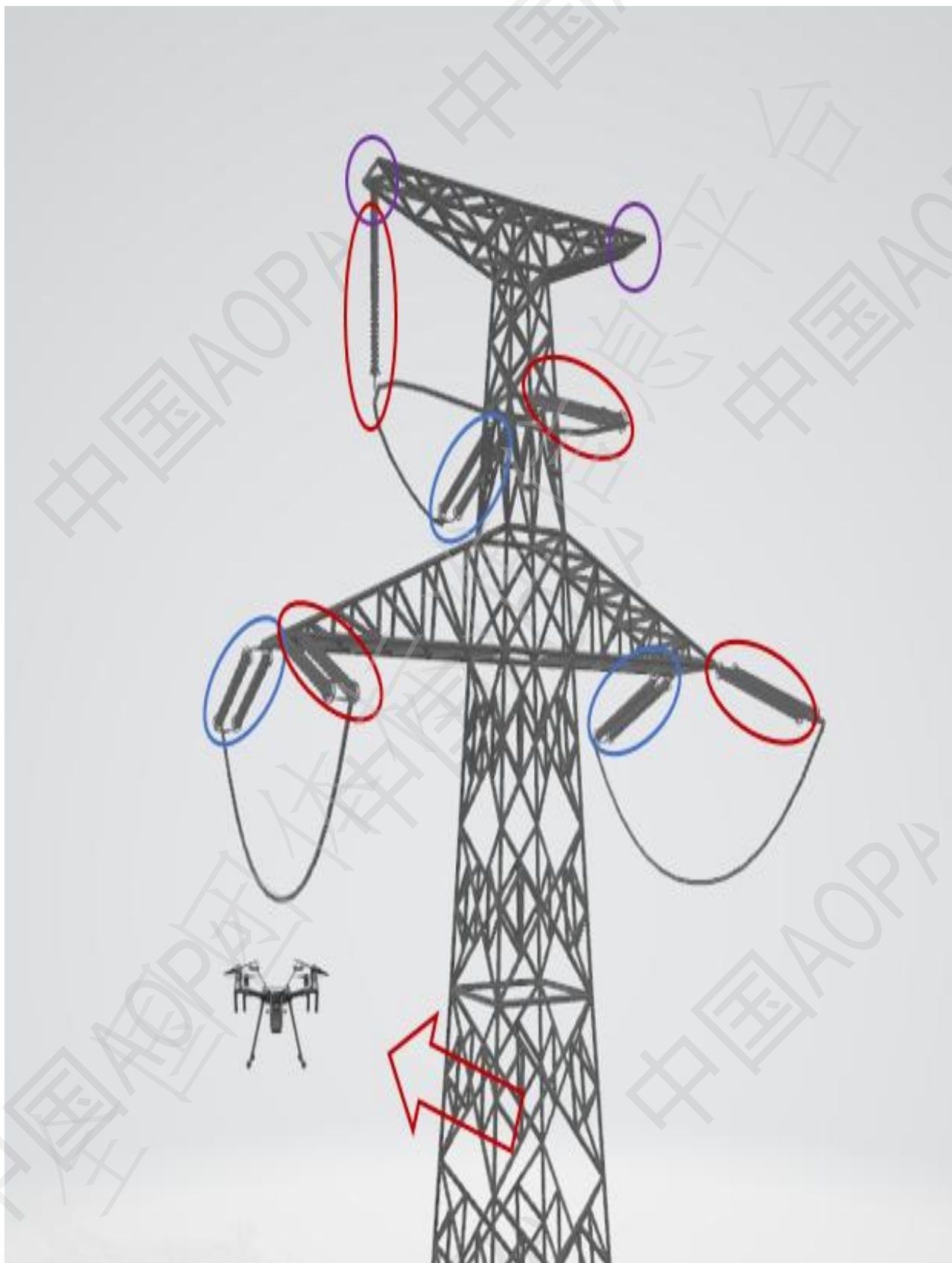


图 L.3 500 kV 及以上单回耐张塔拍摄顺序

表 L.4 220 kV 及以下等级拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄, 角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	中相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
4	中相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
5	中相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
6	右相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
7	右相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
8	右相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
9	左地线线夹	1 张	含防振锤
10	左相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
11	左相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
12	左相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
13	线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
14	杆塔塔基	1 张	

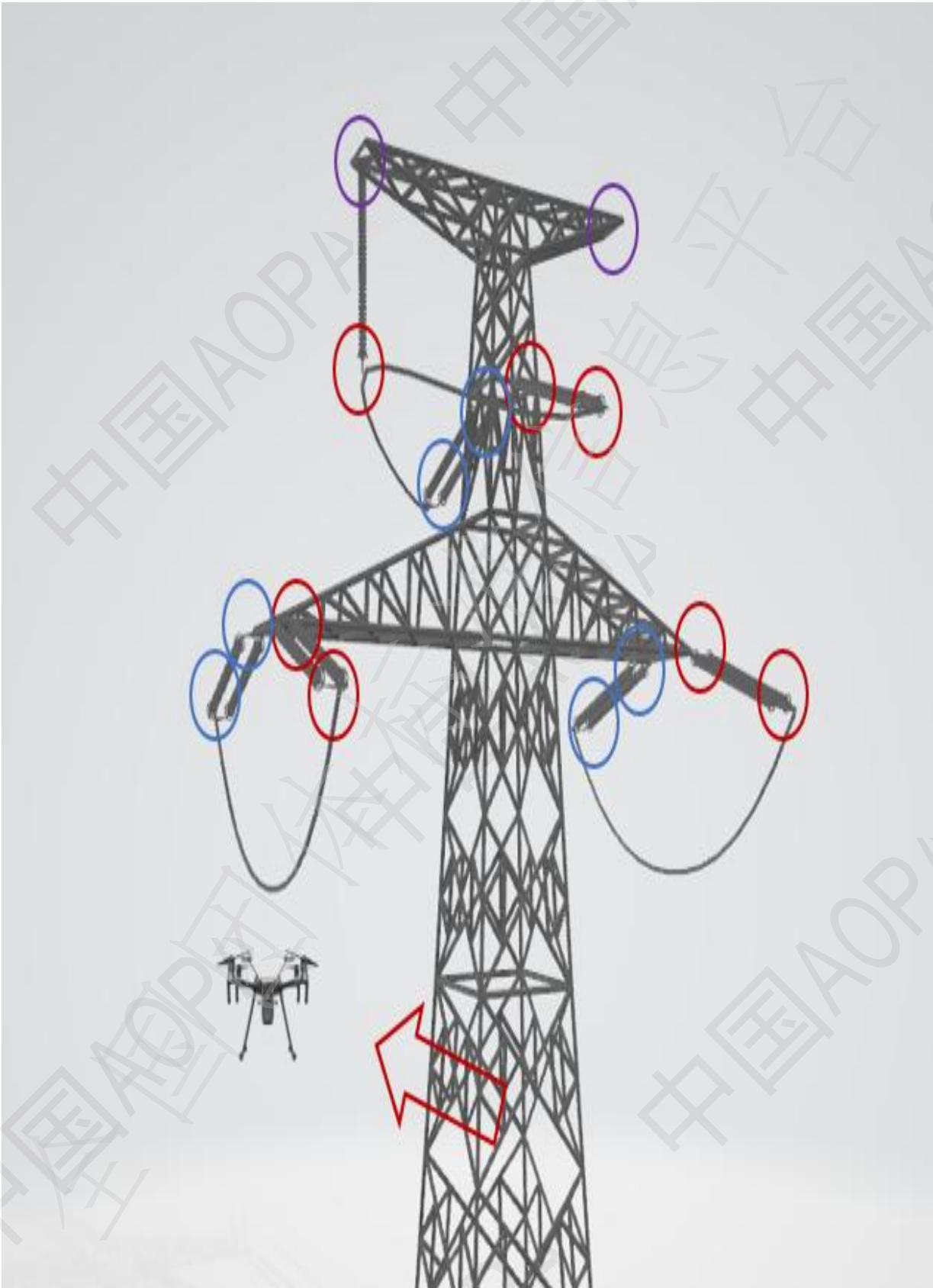


图 L.4 220 kV 及以下等级单回耐张塔拍摄顺序

表 L.5 500 kV 及以上等级双回路直线塔拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄，角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	右侧上相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
4	右侧上相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
5	右侧中相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
6	右侧中相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
7	右侧下相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
8	右侧下相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
9	右侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
10	左地线线夹	1 张	含防振锤
11	左侧上相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
12	左侧上相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
13	左侧中相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
14	左侧中相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
15	左侧下相绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
16	左侧下相绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
17	左侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
18	杆塔塔基	1 张	

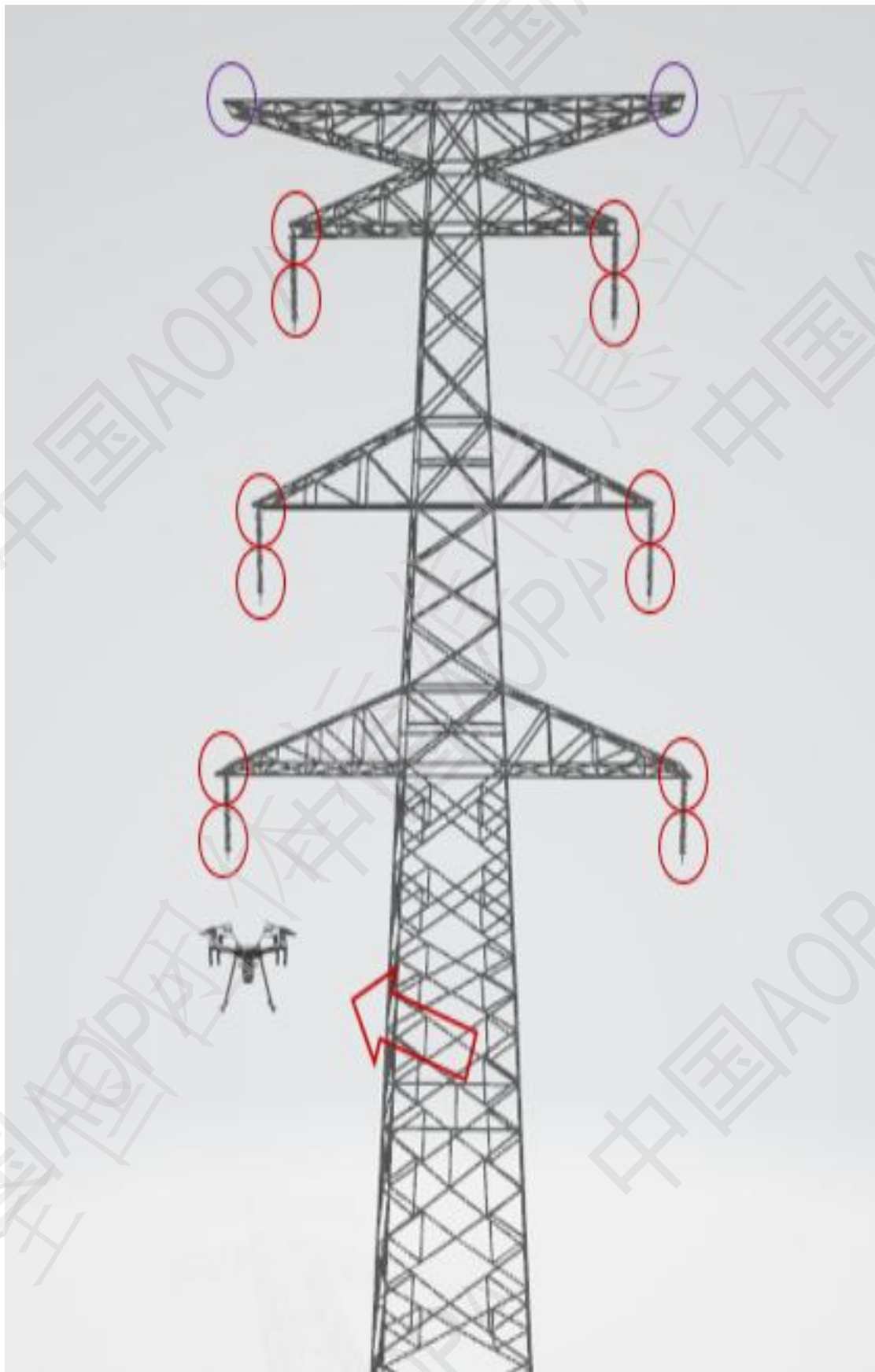


图 L.5 500 kV 及以上等级同塔双回直线塔拍摄顺序

表 L.6 220 kV 及以下等级拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄, 角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	右侧上相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
4	右侧中相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
5	右侧下相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
6	右侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
7	左地线线夹	1 张	含防振锤
8	左侧上相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
9	左侧中相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
10	左侧下相绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
11	左侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
12	杆塔塔基	1 张	

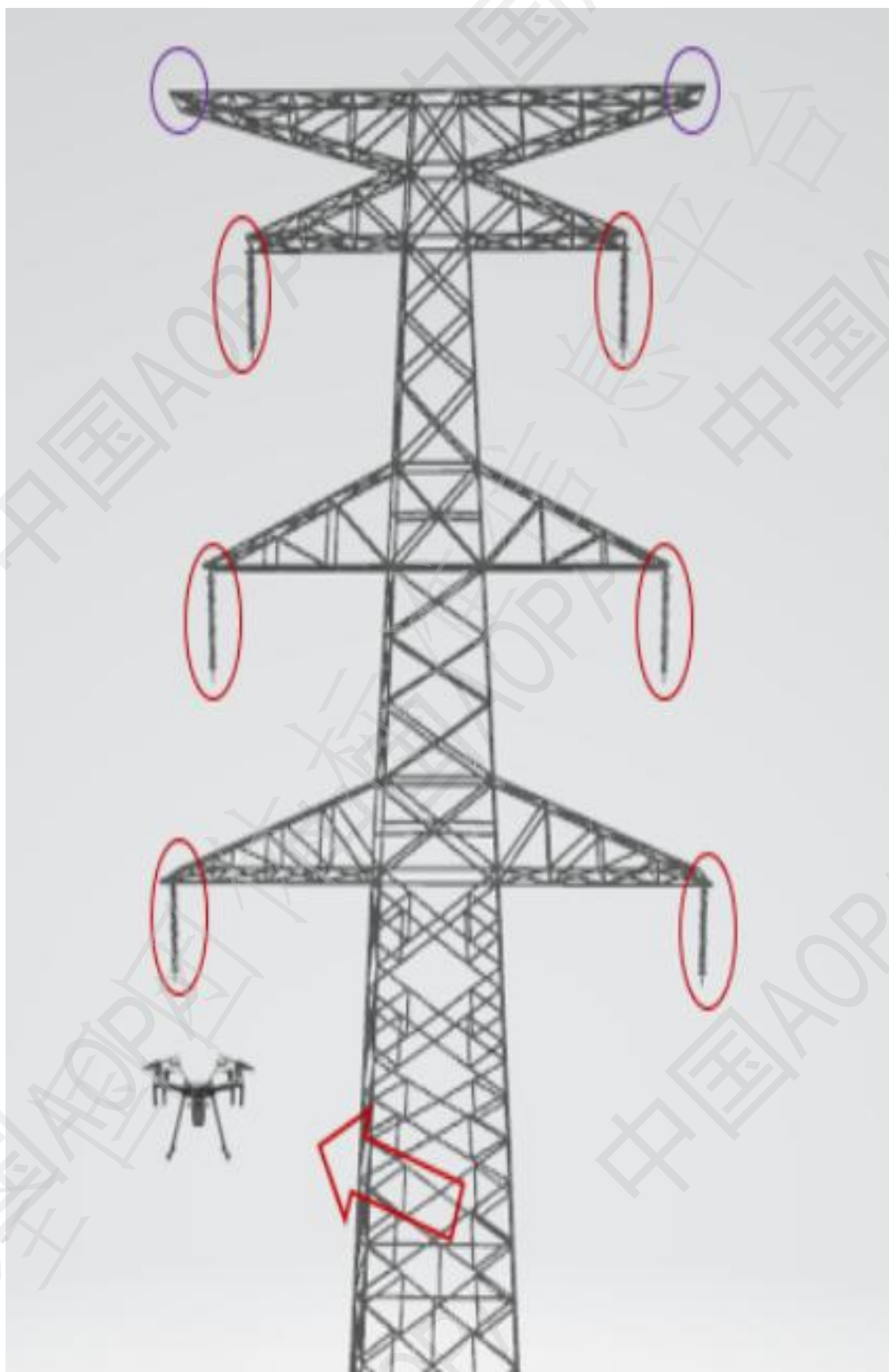


图 L.6 220 kV 及以下等级同塔双回直线塔拍摄顺序

表 L.7 500 kV 及以上等级双回路转角塔拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄，角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	右侧上相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
4	右侧上相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
5	右侧上相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
6	右侧上相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
7	右侧上相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
8	右侧上相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
9	右侧中相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
10	右侧中相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
11	右侧中相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
12	右侧中相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
13	右侧中相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
14	右侧中相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
15	右侧下相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
16	右侧下相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
17	右侧下相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
18	右侧下相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
19	右侧下相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
20	右侧下相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
21	右侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
22	左地线线夹	1 张	含防振锤
23	左侧上相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
24	左侧上相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
25	左侧上相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
26	左侧上相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
27	左侧上相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
28	左侧上相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤

表 L.7 500 kV 及以上等级双回路转角塔拍摄要求 (续)

29	左侧中相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
30	左侧中相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
31	左侧中相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
32	左侧中相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
33	左侧中相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
34	左侧中相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
35	左侧下相大号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
36	左侧下相大号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
37	左侧下相小号侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
38	左侧下相小号侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
39	左侧下相跳线侧绝缘子横担连接处	1 张	含线夹、防振锤
40	左侧下相跳线侧绝缘子导线连接处	1 张	含线夹、防振锤
41	左侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
42	杆塔塔基	1 张	

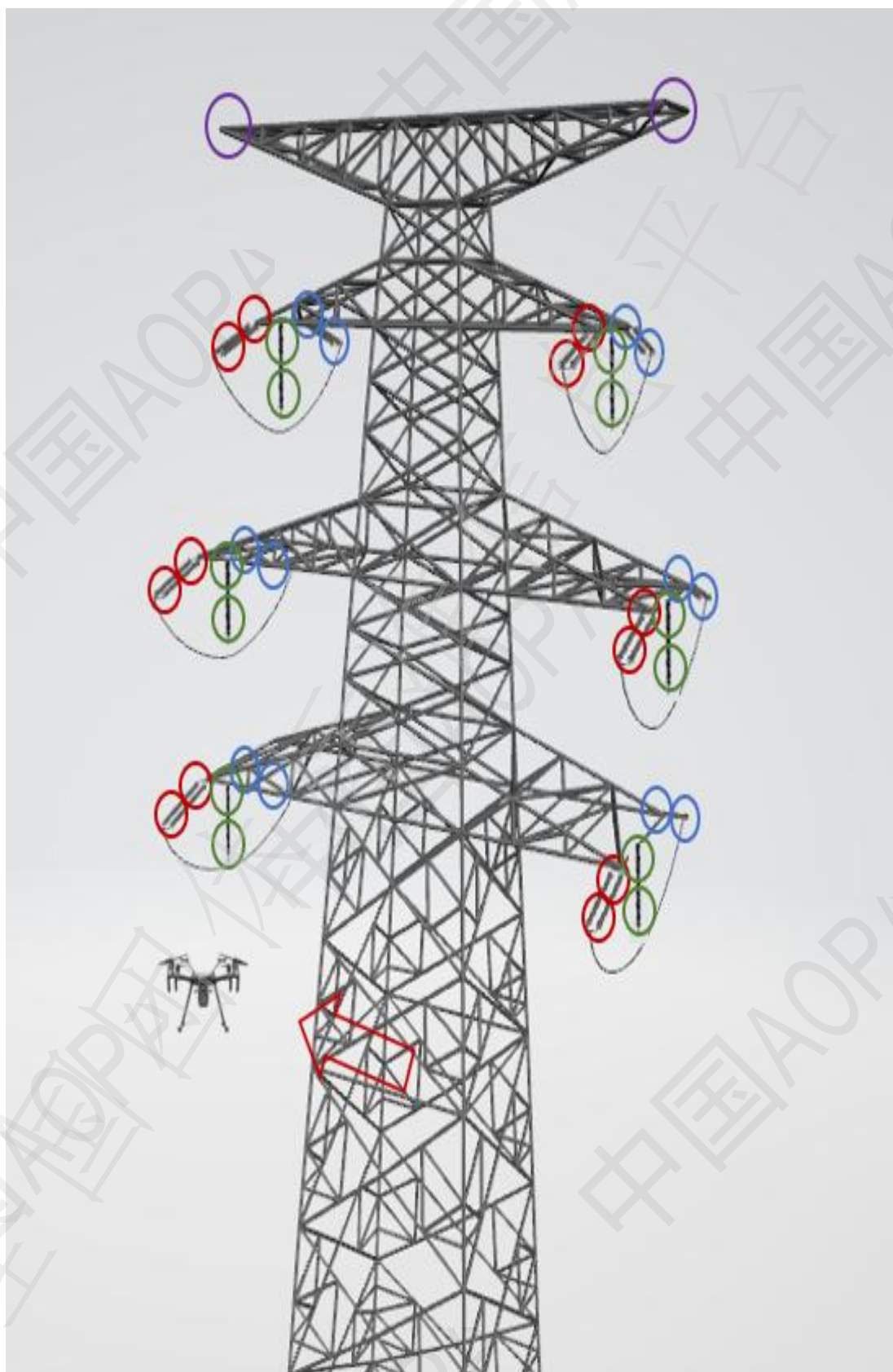


图 L.7 500 kV 及以上等级同塔双回路转角塔、耐张塔拍摄顺序

表 L.8 35 kV 以上及 220 kV 以下等级拍摄要求

拍摄顺序	拍摄对象	拍摄数量	备注
1	杆塔整体全景照片	1 张	镜头从上向下拍摄，角度 30°
2	右地线线夹	1 张	含防振锤
3	右侧上相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
4	右侧上相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
5	右侧上相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
6	右侧中相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
7	右侧中相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
8	右侧中相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
9	右侧下相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
10	右侧下相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
11	右侧下相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
12	右侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
13	左地线线夹	1 张	含防振锤
14	左侧上相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
15	左侧上相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
16	左侧上相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
17	左侧中相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
18	左侧中相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
19	左侧中相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
20	左侧下相大号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
21	左侧下相小号侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
22	左侧下相跳线侧绝缘子	1 张	含线夹、防振锤
23	左侧线路标牌	1 张	大号侧往小号侧方向
24	杆塔塔基	1 张	



图 L.8 同塔双回耐张塔拍摄顺序

L.1 其他类型杆塔

L.1.1 门型水泥杆塔

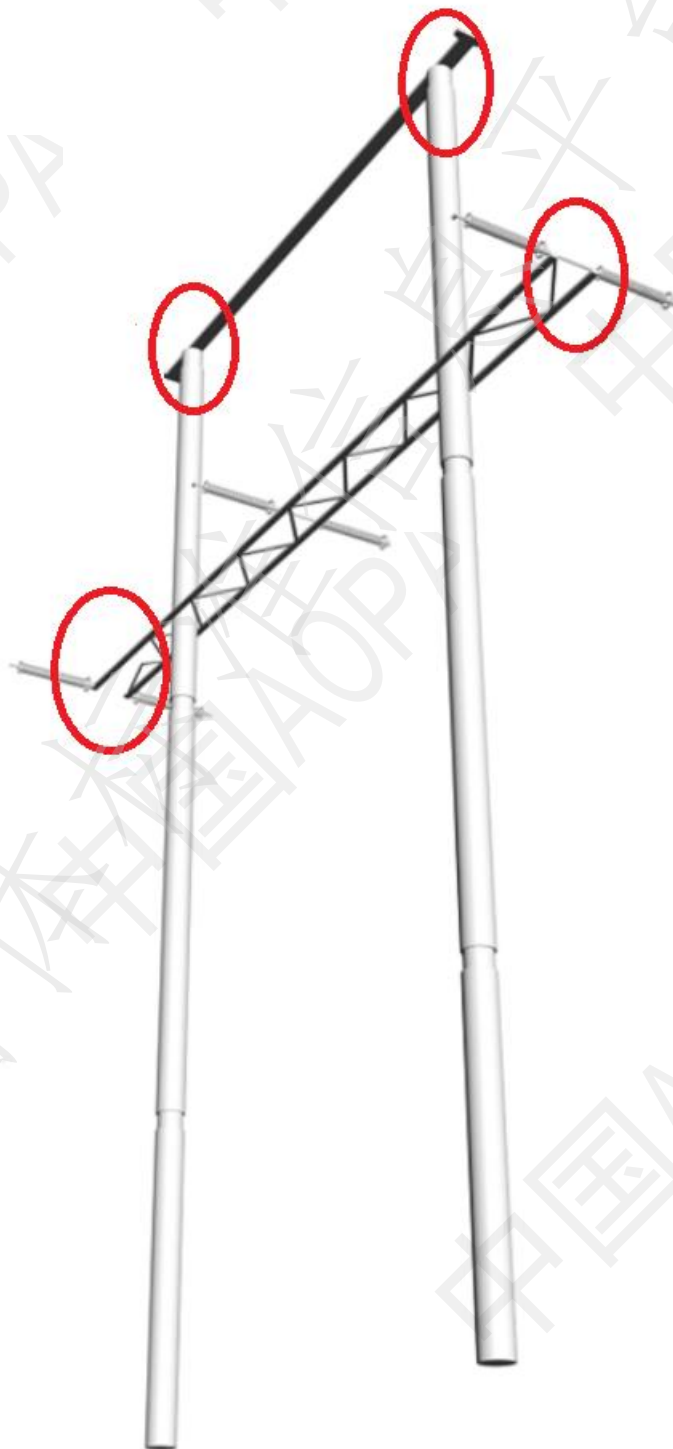


图 L.1.1 门型水泥杆塔

L. 1.2 架空转电缆终端塔

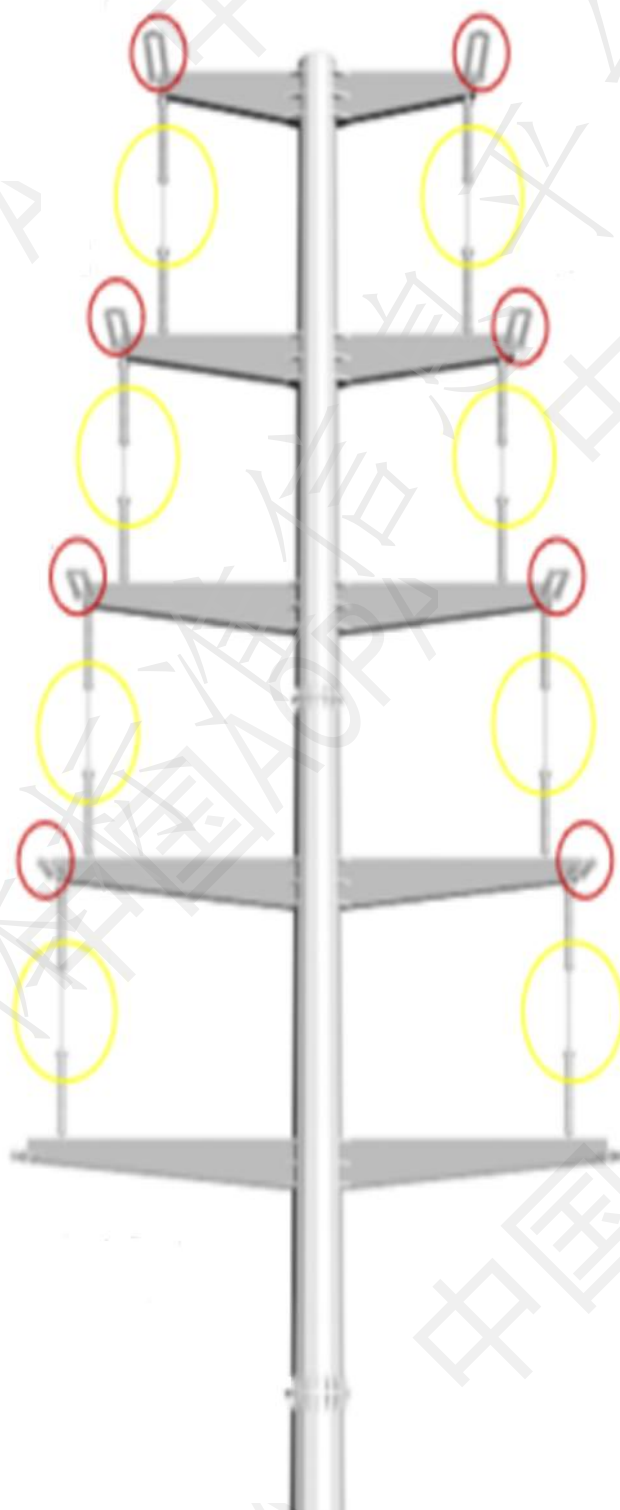


图 L. 1.2 架空转电缆终端塔

L. 1.3 直流直线塔

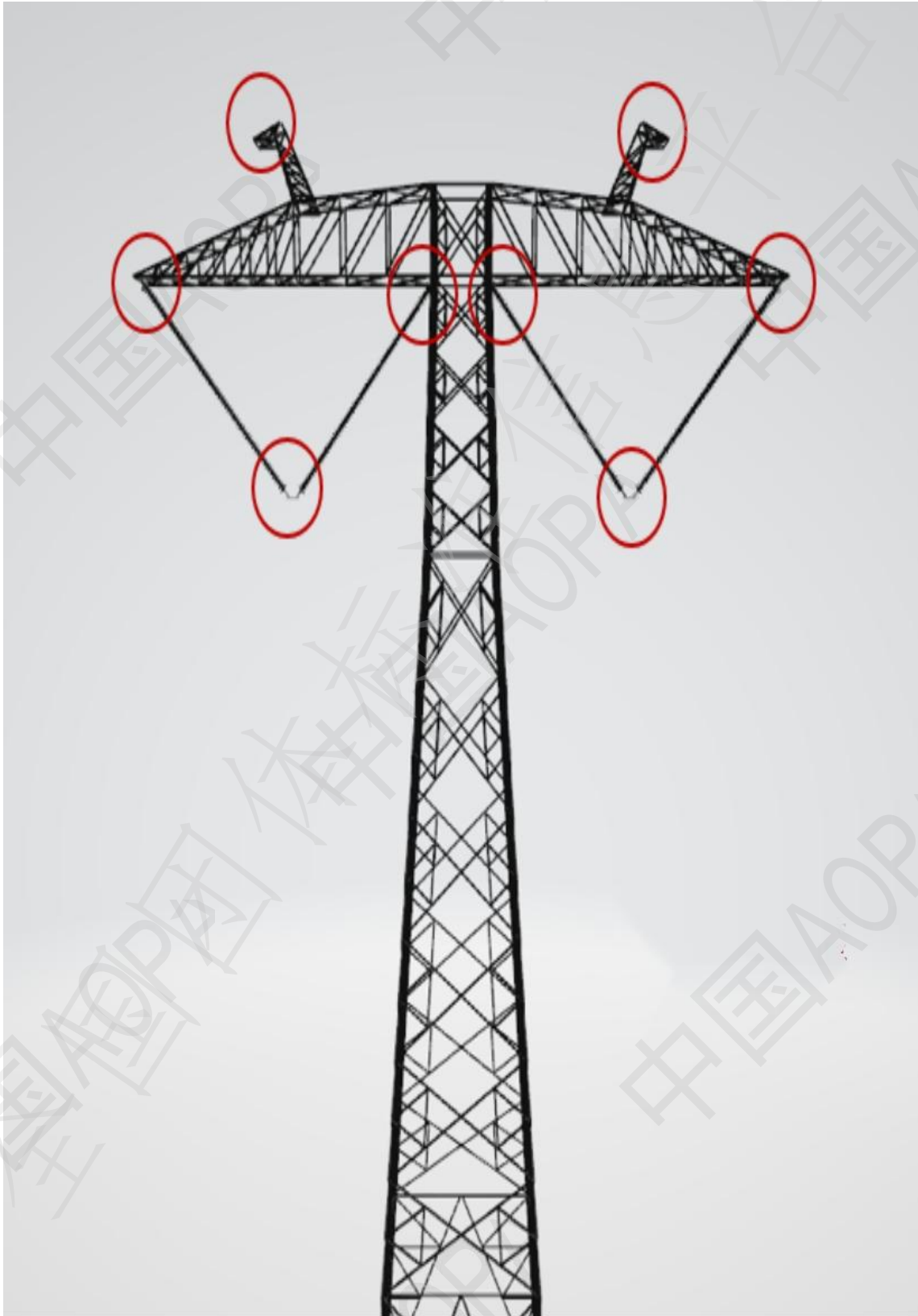


图 L. 1.3 直流直线塔

L. 1.4 直流

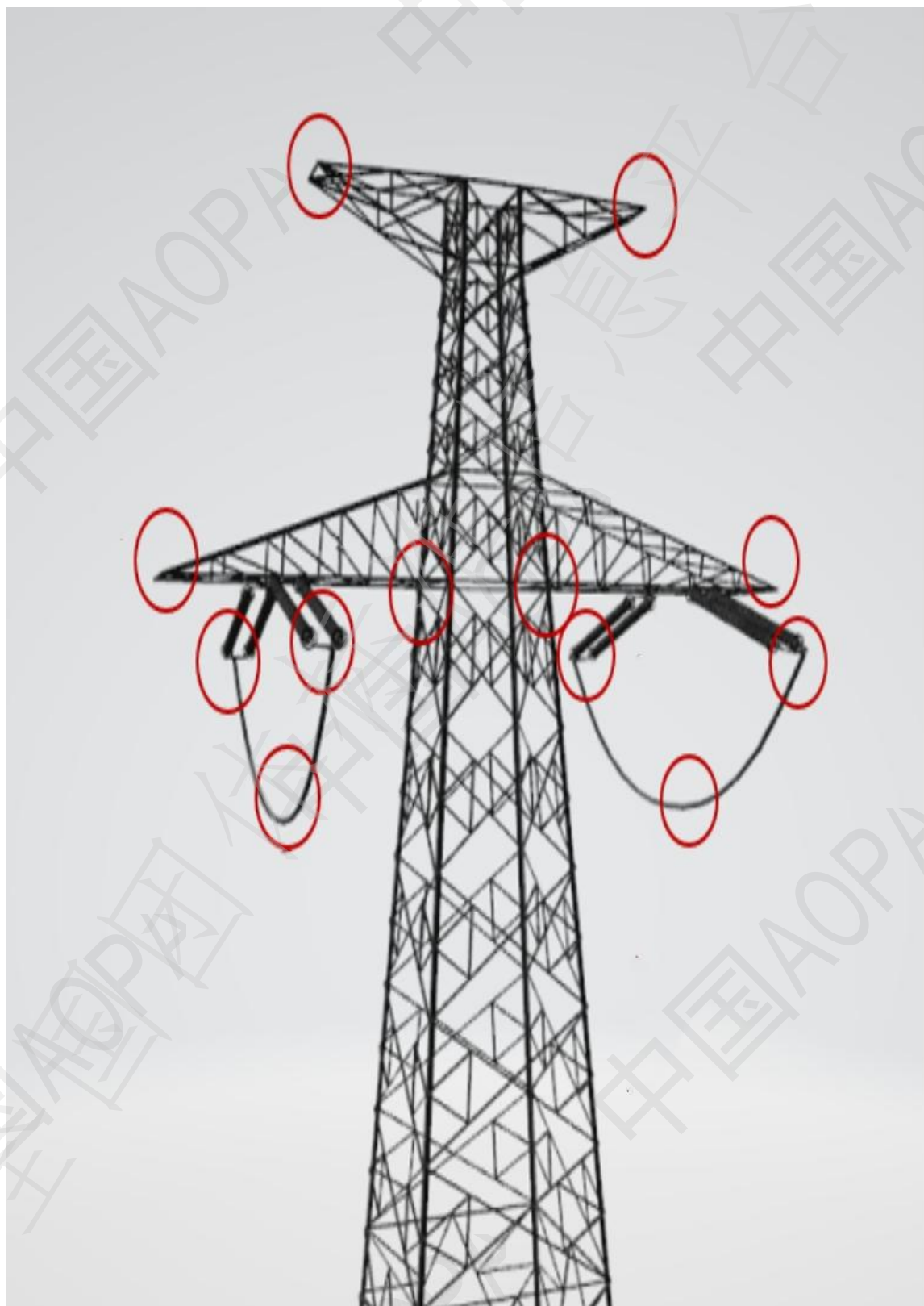


图 L. 1.4 直流

附 录 M  
(资料性)  
现场人员配备

表 M.1 为无人机三维激光现场作业人员平配置要求。

表 M.1 现场人员配备

序号	岗位名称	建议配备人数	人员职责分工
1	现场负责人	1	输电线路巡检作业任务分配与管理； 根据无人机巡检作业计划，按相关要求办理空域审批手续，并密切跟踪空域变化情况。
2	无人机操作员	1	现场环境勘察，获取巡检线路走向、走势、交叉跨越、地形地貌等信息； 无人机操控； 航线规划； 无人机设备管理。
3	激光雷达设备操作员	1	协助无人机操作员完成现场环境勘察； 激光雷达设备操作、扫描数据下载与质量检查； 激光雷达设备管理。
4	数据处理人员	1	三维激光雷达扫描现场数据预处理； 成果资料整理。

## 附录 N

(资料性)

## 现场（作业）风险及预控措施表

表 N.1 为作业现场风险及管控措施。

表 N.1 现场（作业）风险及预控措施表

序号	风险类别	风险名称	建议采取的控制措施
2	设备安全	设备运行故障	无人机巡检系统飞行时，若通讯链路长时间中断，且在预计时间内仍未返航，应根据掌握的无人机巡检系统最后地理坐标位置或机载追踪器发送的报文等信息及时寻找。
		巡检设备安装和固定不达标	1、严格按照设备说明书对设备进行安装调试。 2、现场巡检（作业）前需进行设备检查，不具备条件拒绝放行。
		仪器运输不当	仪器需装在专用箱内，并专人保管，在运输时必须锁紧内部螺母，防止抖动。
		物体打击	1、交通运输过程中注意对数据储存设备进行保护； 2、数据传输过程中注意储存设备放置，避免坠落； 3、对巡检资料进行双备份。
		环境影响	1、现场作业区域出现雷雨、大风等可能影响作业的突变天气时，应及时评估巡检作业安全性，在确保安全后方可继续执行巡检作业，否则应采取控制无人机巡检系统避让、返航或就近降落。 2、巡检作业区域出现其他飞行器或飘浮物时，应立即评估巡检作业安全性，在确保安全后方可继续执行巡检作业，否则应采取避让措施。
		其他风险	无人机巡检系统飞行过程中，若班组成员身体出现不适或受其他干扰影响作业，应迅速采取措施保证无人机巡检系统安全，情况紧急时，可立即控制无人机巡检系统返航或就近降落。

附 录 0  
(资料性)  
主要设备及工器具配备

表 0.1 为无人机现场作业设备及相关工器具的准备。

表 0.1 主要设备及工器具配备

序号	巡检设备	性能要求	数量	功能	备注
1	激光雷达系统	俯仰/翻滚角精度优于 0.05 度，航向角精度优于 0.05 度； 存储容量 $\geq 128$ G； 最大激光测距 $\geq 200$ m； 测距精度优于 10 cm； 高程精度优于 15 cm，平面精度优于 20 cm； 含相机，可同步获取影像、激光雷达、IMU、GPS 信息；	1	获取激光雷达数据、航迹数据、影像数据	必配
2	RTK 基站	初始化时间 $< 10$ s； 初始化可靠性 $> 99.9\%$ ； 信号通道：120 个动态通道、GPS:L1, L2, L2C, LC GLONASS:L1, L2, L2C BDS:B1, B2 GALILEO:E1, E5a, E5b, ALtBOC, SBAS, QZSS, L-band	1	获取静态基站数据	必配
3	电台	与设备通讯距离 $\geq 1$ 公里；	1	实现地面站与电脑之间的通讯	必配
4	工具包		1		必配
5	U 盘或网线		1	数据下载	必配
6	设备挂载板		1	设备与飞行挂载的挂载件	必配
7	地面站(含设备控制和数据解算软件)	1、可实时显示点云数据、设备状态信息； 2、可远程控制激光雷达开始采集数据和停止采集数据； 3、支持采集工程数据回放，可重现点云数据的采集过程； 4、解算软件支持航迹数据解算并可生成航迹数据精度报告。 5、解算软件支持点云数据进行实时解算和后差分解算，支持真彩色点云解算	1		必配

表 0.1 主要设备及工器具配备（续）

8	无人机		1		必配
9	平板		1		必配
10	飞机遥控器		1		必配
11	相机 SD 卡		1	用于存储采集的影像数据	必配
12	读卡器		1	用于拷贝影像数据	选配
13	通用五金工具		1		必配
注：以上设备及工器具为一架无人机作业最低配置。					

附录 P  
(资料性)  
精度值要求

表 P.1 为点云数据精度要求。

表 P.1 精度值要求

指标	范围
联合解算分离值	不大于 5 cm
Pdop 值	不大于 4
卫星数量	不小于 8 个
姿态分离值	与惯导型号有关
文件数据覆盖	基站数据完全覆盖 imu 数据
质量因子	固定解

## 附录 Q

(资料性)

## 无人机硬件技术要求

表 Q.1 为无人机执行各类巡检作业对硬件的要求。

表 Q.1 无人机硬件技术要求

自动驾驶类型	定位系统	传感器	像素	续航
通道模式	GPS	可见光	≥2000 万	≥20 min
树障模式	GPS	可见光	≥2000 万	≥20 min
精细化模式	GPS+RTK	可见光、红外	可见光≥2000 万 红外≥320*240	≥25 min