doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.030

基于RTK无人机的杆塔安装质量快速检查技术研究

孙　强[1]，闫国兵[1]，陈永洪[1]，蔡振华[1*]，杨芒生[2]，杨建勇[2]
（1. 广东电网有限责任公司，广东 广州 510620；2. 广东电网有限责任公司茂名供电局，广东 茂名 525100）

摘　要：输电线路工程的验收是保障电力系统质量的重要环节。为了实现输电线路工程验收中杆塔安装质量快速检查，研究了基于RTK无人机的杆塔安装质量快速检查技术。该技术基于RTK无人机获取杆塔的高分辨率光学影像，通过PPK空三解算方法获取每幅影像的高精度外方位元素，依据双相机立体量测原理进行杆塔安装几何精度的快速检查。以广东省云浮市作为实验区完成验证，实验结果表明这种方法具有可行性和有效性，为输电线路工程的验收提供了一种低成本、高精度的技术手段。

关键词：无人机；杆塔；RTK；立体视觉
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0141-05

Research on Rapid Inspection Technology of Pole and Tower Installation Quality Based on RTK UAV

SUN Qiang[1], YAN Guobing[1], CHEN Yonghong[1], CAI Zhenhua[1], YANG Mangsheng[1], YANG Jianyong[2]
(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;2. Maoming Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Maoming 525100, China)

Abstract: The acceptance of transmission line engineering is an important link to ensure the quality of power system. In order to realize the rapid inspection of pole and tower installation quality in the acceptance of transmission line engineering, we studied the rapid inspection technology of pole and tower installation quality based on RTK UAV. This technology acquires high-resolution optical images of poles and towers by using RTK UAV, obtains the high-precision external orientation elements of each image by PPK aerotriangulation solution method, and according to the dual camera stereo measurement principle checks the geometric accuracy of pole and tower installation quickly. The experimental result, which is verified in the experimental area of Yunfu City, Guangdong Province, shows that this method is feasible and effective, which can provide a low cost, high-precision technical means for transmission line engineering acceptance.

Key words: UAV, poles and tower, RTK, stereo vision

RTK即实时动态差分技术，是基于载波相位观测值的实时动态定位技术。在RTK作业模式下，基准站通过数据链将其观测值和观测站坐标信息一起传送给移动站。移动站不仅通过数据链接收来自基准站的RTCM数据，还要通过自身板卡及天线采集GPS观测数据，并在系统内组成差分观测值进行实时处理，同时给出厘米级定位结果，历时不足1 s。将RTK技术应用于无人机大幅提高了无人机的定位精度，可以实现更精确的飞行，得到更高精度的遥感测量结果，为输电线路工程的验收提供了一种更先进的方式[1-7]。

目前，应用RTK无人机进行输电线路工程的验收的研究还少见报道。本文研究了基于RTK无人机的杆塔安装质量快速检查技术，以广东省云浮市西南500 kV架空输电线路的验收为例，介绍了RTK无人机在杆塔安装质量快速检查方面的应用，可为相关研究工作提供参考。

1　RTK无人机杆塔安装质量快速检查技术

基于RTK无人机的杆塔安装质量快速检查，使用带RTK功能的无人机获取杆塔的高分辨率光学影像，通过PPK空三解算获取每幅影像的高精度外方位元素，恢复出影像之间的相对关系，并依据双相机立体量测原理利用影像对构建立体量测环境，进行杆塔安装质量的几何检查。该方法涉及到的主要技术点有数字相机检校、基于PPK的空三解算和双相机立体量测等。

1.1　数字相机检校

相机检校是无人机遥感中至关重要的一个步骤，

收稿日期：2021-06-15。
（*为通信作者）

相机检校是否精确，会直接影响后续测图及三维重建精度[8]。通常在作业前对相机进行检校，检校方法采用专业检校场进行。由于相机是以中心投影方式进行成像，理想情况下，地物点、投影中心、像点在同一直线上。然而实际上，所有的相机光学系统都存在或多或少的非线性畸变。因此，检校的主要内容有相机内方位元素和光学畸变系数。为了补偿相机光学系统的非线性畸变，通常在中心投影的成像方程中引入畸变模型，然后基于控制点或其他方法求解畸变系数来对图像进行校正[8-9]。

目前，常用的数字相机畸变模型为包含径向畸变和切向畸变的Brown模型[10]。

$$\begin{cases}\Delta X=(x-x_0)\left(k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6+\cdots\right)+p_1\left[r^2+2(x-x_0)^2\right]+\\ \quad 2p_2(x-x_0)(y-y_0)+\alpha(x-x_0)+\beta(y-y_0)\\ \Delta Y=(y-y_0)\left(k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6+\cdots\right)+p_2\left[r^2+2(y-y_0)^2\right]+\\ \quad 2p_1(x-x_0)(y-y_0)\end{cases} \tag{1}$$

式中，k_1,k_2,k_3 为径向畸变系数；p_1、p_2 为切向畸变系数；α、β 分别为CCD的非正方形比例因子和非正交比例因子；r 为像点的径向距离。即 $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}$。

相机检校时，将相机置于控制场中拍摄一定数量的检校影像，并依据多片后方交会原理进行整体平差。由于公式（1）为非线性数学模型，无法直接解算，需对其进行线性化，按照泰勒公式展开，可得到单相机多片联合检校的误差方程为：

$$V=\sum_{i=1}^{i=n}\boldsymbol{A}^iX_{外}^i+BX_{内}+\boldsymbol{D}_{ad}X_{ad}-L \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{A}^i$ 为第 i 张检校片的外方位元素系数矩阵；$X_{外}^i$ 为第 i 张检校片的外方位元素改正值；$X_{内}$ 为相机的内方位元素改正值；X_{ad} 为相机畸变模型畸变系数改正值；$\boldsymbol{D}_{ad}$ 为相应畸变系数的系数矩阵。

当获取一定数量的控制点坐标及与之对应的像点坐标后，即可迭代求解。迭代开始时，外方位及内方位元素初始值可采用直接线性变换（direct linear transformation，DLT）解算[10]，光学畸变系数初始值可直接设置为0。迭代求解过程中，未知数的所有角元素改正值均小于某一极小阈值时，迭代结束，未知数取所有迭代改正值之和。

1.2 基于PPK的空三解算

PPK技术是最早的GPS动态差分技术方式，又称半动态法、准动态相对定位法、走走停停（Go and Stop）法。其工作原理是利用一台进行同步观测的基准站接收机和至少一台流动接收机，对GPS卫星进行同步观测；也就是基准站保持连续观测，初始化后的流动站迁站至下一个待定点，在迁站过程中需要保持对卫星的连续跟踪，以便将整周模糊度传递至待定点。基准站和流动站同步接收的数据在计算机中进行线性组合，形成虚拟的载波相位观测量，确定接收机之间的相对位置，最后引入基准站的已知坐标，从而获得流动站的三维坐标[11]。PPK技术可以为无人机影像的空三解算提供高精度的初始值，得到较为准确的影像外方位元素。

利用PPK解算方法，可获取影像曝光时刻高精度的空间位置信息，将其作为观测量参与区域网平差，有效解决了低空摄影测量队地面控制点的依赖问题，可使摄影测量需要的野外作业大量减少[12]。基于PPK的光束法区域网平差模型为：

$$\begin{bmatrix}X_s\\Y_s\\Z_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}_{GPS}-\left(\boldsymbol{R}\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}_{GPS}+\begin{bmatrix}a_X\\b_Y\\c_Z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}b_X\\b_Y\\b_Z\end{bmatrix}(t-t_0)\right) \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix}x\\y\\-f\end{bmatrix}=\lambda\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\left(\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}X_S\\Y_S\\Z_S\end{bmatrix}\right) \tag{4}$$

式中，$\begin{bmatrix}X_s & Y_s & Z_s\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 为实际曝光时刻投影中心的坐标；$\boldsymbol{R}$ 为影像外方位元素的3个角元素所构成的正交变换矩阵；$\begin{bmatrix}x & y & -f\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 为像点在像空间坐标系下的坐标值；$\begin{bmatrix}X & Y & Z\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 为像点在像空间辅助坐标系下的坐标值；$\begin{bmatrix}X & Y & Z\end{bmatrix}_{GPS}^{\mathrm{T}}$ 为相机曝光时刻记录的摄站点GPS位置；$\begin{bmatrix}x & y & z\end{bmatrix}_{GPS}^{\mathrm{T}}$ 为GPS天线相位中心在像空间坐标系下的坐标值；$\begin{bmatrix}a_X & a_Y & a_Z\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 和 $\begin{bmatrix}b_X & b_Y & b_Z\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 分别为GPS线性偏移系统误差改正数中的固定部分和随时间变化的部分；t 为该曝光点的曝光时刻；t_0 为参考时刻。

1.3 双相机立体量测

对于杆塔安装中一些具体几何量的量测采用双相机立体量测的方法进行。当完成基于PPK的空三解算之后，即可获取每一张影像的投影矩阵。

$$P_j=\boldsymbol{K}_j\left[\boldsymbol{R}_j\middle|t_j\right] \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{K}_j$ 为第 j 张影像的内矩阵，由相机的内方位元素组成；$\boldsymbol{R}_j$ 为第 j 张影像的旋转矩阵；$t_j=-\boldsymbol{R}_jc_j$ 且 c_j 是第 j 张影像的投影中心。

双相机立体量测即根据双像像点量测坐标，解算其对应的物方坐标。若待解算地面点坐标为$[X \quad Y \quad Z]^{\mathrm{T}}$，其对应的像点坐标为$\left[x_j \quad y_j\right]^{\mathrm{T}}$，将其代入公式（5）并整理可得：

$$\begin{cases} x_j = \dfrac{p_{00}^{(j)}X + p_{01}^{(j)}Y + p_{02}^{(j)}Z + p_{03}^{(j)}W}{p_{20}^{(j)}X + p_{21}^{(j)}Y + p_{22}^{(j)}Z + p_{23}^{(j)}W} \\ y_j = \dfrac{p_{10}^{(j)}X + p_{11}^{(j)}Y + p_{12}^{(j)}Z + p_{13}^{(j)}W}{p_{20}^{(j)}X + p_{21}^{(j)}Y + p_{22}^{(j)}Z + p_{23}^{(j)}W} \end{cases} \tag{6}$$

将公式（6）整理变形整理，可得公式（7）：

$$\begin{cases} (p_{00}^{(j)} - x_j p_{20}^{(j)})X + (p_{01}^{(j)} - x_j p_{21}^{(j)})X + (p_{02}^{(j)} - x_j p_{21}^{(j)})X + p_{03}^{(j)}W + x_j p_{23}^{(j)}W = 0 \\ (p_{10}^{(j)} - y_j p_{20}^{(j)})X + (p_{11}^{(j)} - y_j p_{21}^{(j)})X + (p_{12}^{(j)} - y_j p_{21}^{(j)})X + p_{13}^{(j)}W + y_j p_{23}^{(j)}W = 0 \end{cases} \tag{7}$$

公式（7）用矩阵形式可表示为：

$$\boldsymbol{AX} + \boldsymbol{L} = 0 \tag{8}$$

式中，

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} p_{00}^{(j)} - x_j p_{20}^{(j)} & p_{01}^{(j)} - x_j p_{21}^{(j)} & p_{02}^{(j)} - x_j p_{21}^{(j)} \\ p_{10}^{(j)} - y_j p_{20}^{(j)} & p_{11}^{(j)} - y_j p_{21}^{(j)} & p_{12}^{(j)} - y_j p_{21}^{(j)} \end{bmatrix}; \quad X = [XYZ]^{\mathrm{T}};$$

$$L = \begin{bmatrix} p_{03}^{(j)}W + x_j p_{23}^{(j)}W \\ p_{03}^{(j)}W + x_j p_{23}^{(j)}W \end{bmatrix}。$$

公式（8）即为双像立体量测的误差方程。当分别量测左、右影像上对应地物点的像点坐标之后，将其代入公式（8），按照间接平差原理直接解算，即可获取物方点的物方坐标。

2　实验结果与分析

2.1　实验区概况

实验区位于广东省云浮市西南，云浮市地势西南高，东北低，丘陵是云浮市主要地貌，多沿山地边缘发育，高丘陵海拔250～450 m，低丘陵海拔100～250 m。低丘陵坡度平缓，多为15～20°。本次实验为500 kV架空输电线路，塔高平均在80 m左右。架空输电线全长203.23 km，如图1所示，共包含445个塔杆。



图1　测区线路图

2.2　无人机影像采集系统

实验区无人机影像采用大疆Phantom 4 RTK无人机，如图2所示。该无人机搭载RTK导航定位系统和高性能成像系统，其RTK水平定位精度为1 cm+1 ppm，RTK垂直定位精度为1.5 cm+1 ppm，同时支持PPK后处理。



图2　大疆Phantom 4 RTK无人机

实验区内共完成3个塔杆的无人机影像数据采集，同时为了验证本文方法的几何量测精度，在采集无人机影像同时分别布设一定数量的像控点，用于检核本文空三方法的几何精度。其详细信息如表1所示。

表1　实验区无人机影像信息

塔杆编号	影像数量/张	影像尺寸/像素	检查点/个
N702	18	5 472 × 3 648	11
J110	22	5 472 × 3 648	10
GN28	21	5 472 × 3 648	11

2.3　结果分析

首先，按照1.1节方法完成无人机相机系统的高精度几何标定。将无人机置于三维控制场中，拍摄一定数量的检校片，如图3所示。

图3a、b为两张获取的检校片，图3c为控制场的控制点分布图。利用手动量测方式获取控制点对应的像点坐标，并基于公式（2）建立误差方程进行多片联合几何检校，结果如表2所示。

将表2平差结果带入共线条件方程，计算每一个像控点残差，并统计平差精度如表3所示。

分析表3结果可知，利用室外高精度三维控制场进行Phantom 4 RTK相机几何检校，其像点残差最大不超过0.141像素，总体中误差小于0.117像素，远远小于常规检校中误差小于0.3像素的检校需求。



a b c

图3 相机检校影像及其控制点分布样例

表2 相机检校结果

f /mm	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2	beta
8.8	2 679.62	1 789.7	−0.282 045	0.131 418	−0.045 255 8	0.000 724 235	−0.000 048 855	7.88

表3 相机检校几何结果

最大值	最小值	中值	RMS
0.141	0.103	0.114	0.117

其次，分析验证基于PPK的免像控空三精度。此次实验共采集3个塔杆的无人机影像，基于1.2节所述方法，将表2几何的相机几何检校参数作为已知值，完成PPK免像控自动空中三角测量。之后，将测量的像控点作为检查点，检核空三结果几何精度。统计结果如表4所示。

表4 像控点检核PPK空三几何精度结果/m

点号	X 方向误差	Y 方向误差	Z 方向误差	水平RMS	高程RMS	整体RMS
CHK_01	0.120	0.051	0.030	0.092	0.030	0.077
CHK_02	0.135	0.053	0.029	0.103	0.029	0.085
CHK_03	0.134	0.022	0.046	0.096	0.046	0.083
CHK_04	0.122	0.058	0.036	0.096	0.036	0.081
CHK_05	0.102	0.063	0.029	0.085	0.029	0.071
CHK_06	0.155	0.088	0.031	0.126	0.031	0.104
CHK_07	0.167	0.079	0.040	0.131	0.040	0.109
RMS	0.135	0.062	0.035	0.105	0.035	0.088

分析表4结果可知，本文所述方法，其总体误差为0.088 m，总体高程误差为0.035 m，已经达到塔杆几何量测精度不超过0.15 m的精度需求。因此，基于PPK方法的免像控空三结果可以保证塔杆几何量测满足精度要求。

第三，分析验证基于免像控空三结果的双像立体量测精度，完成塔杆安装几何质量检查。

塔杆几何质量检查，主要测量金具的间距是否满足设计要求。本文选取了2种距离量测与一个角度量测作为验证，包括放电间隙、绝缘子长度与绝缘子角度的量测（如图4中的地线放电间隙）。

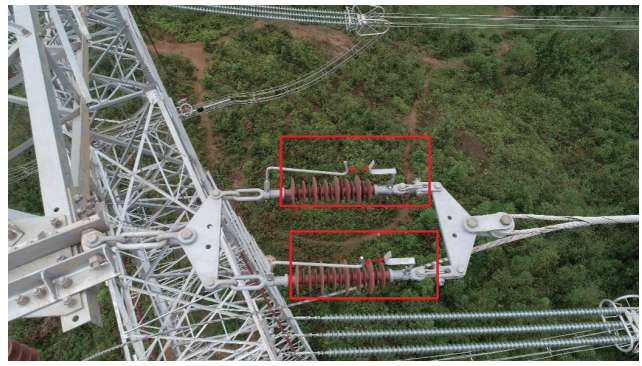
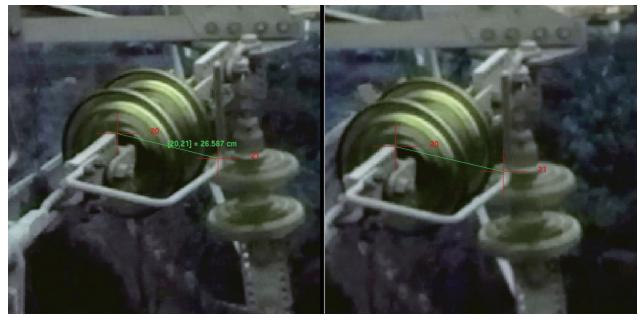


图4 地线放电间隙

利用PPK空三解算结果获取影像的外方位元素，进而拣选成像较完整的两张影像构成立体像对。通过手动及影像匹配方法获取量测物体的像点坐标，进而根据公式（8）建立待量测物点的误差方程，并解释得到其三维坐标，如图5所示。



a b

图5 基于双像立体量测的地线放电间隙量测

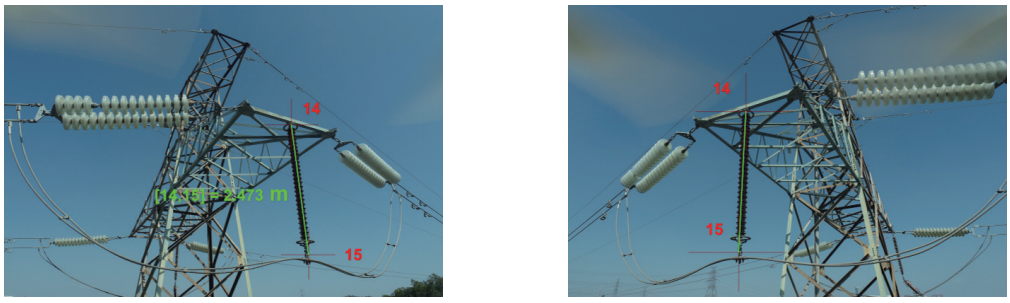
图5a为拣选立体像对的左影像，图5b为拣选立体像对的右影像。通过平差运算得到像点20、21的空间三维坐标，进而可以解算像点20、21之间的间隙，即地线放电间隙的空间距离。如图中所示，基于双像立体量测的地线间隙为26.587 cm，根据现场实测其地线间隙为25.699 cm，2种相差0.888 cm，可以满足塔杆金具距离测量误差小于1 cm的精度需求。

对于绝缘子长度量测，本文以耐张塔I型跳线串作为对象，量测其在竖直方向上的长度，其立体像对影像如图6所示。

基于双像立体量测的绝缘子长度为2.48 m，现场实测的长度为2.473 m，相差0.007 m，即0.7 cm，在1 cm的误差范围以内。

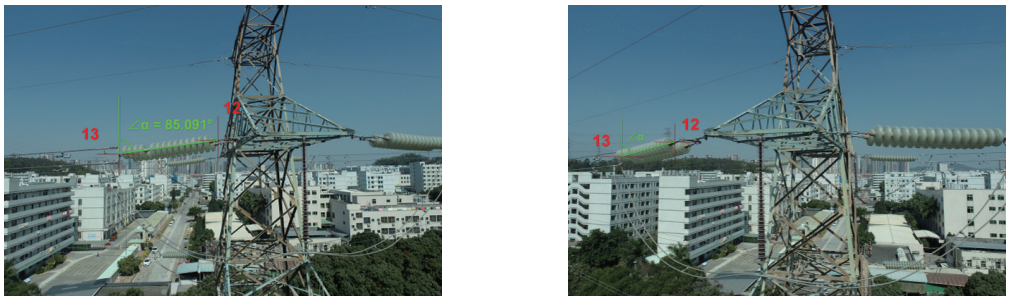
对于绝缘子角度量测，本文以玻璃绝缘子串作为对象，量测其在竖直平面上，与地球铅垂线所交的角度，立体像对影像如图7所示。

基于双像立体量测的角度为85.139°，现场实测的角度为85.091°，相差0.048°，在需求的0.2°误差范围以内。



a　　b

图6　基于双像立体量测的绝缘子长度量测



a　　b

图7　基于双像立体量测的绝缘子角度量测

3　结　论

本文针对输电线路工程验收中杆塔安装质量检查需求，研究了一种基于RTK无人机的杆塔安装质量检查技术。该技术首先基于室外高精度三维控制场完成相机几何检校，进而使用带RTK功能的无人机获取杆塔的高分辨率光学影像数据，通过PPK空三解算方法获取每幅影像的高精度外方位元素，最后通过双像立体量测完成塔杆安装的几何质量检查。通过广东省云浮市实验区实验数据分析可知，该方法是可行、有效的。其金具距离量测误差小于1 cm，夹角测量误差小于0.2°，具有较大的实用推广价值。

参考文献

[1]　邹捷,许瑞庆,习雨同. 深度学习在输电线路工程验收智能缺陷识别中的应用[J]. 江西电力,2020,44(2):5-9

[2]　韩文军,李多,朱承治. 三维激光雷达系统在输电线路工程验收中的应用[J]. 电子设计工程,2019,27(20):18-21

[3]　余磊,高任,程秀楷. 浅谈输电线路竣工验收方法[J]. 中国新通信,2019,21(24):144

[4]　丛高. 浅谈如何提高架空输电线路工程验收工作效率[J]. 科技资讯,2014,12(36):119

[5]　周学明,胡丹晖,吴向东,等. 小型无人机在输电线路故障点查找上的应用与分析[J]. 湖北电力,2015,39(2):38-40

[6]　商智凯,王俊杰,刘欢. 差分定位技术及RTK在无人机的应用[J]. 信息周刊,2019(47):13

[7]　严玲玲,闻铖,王身丽,等. 基于差分定位的输电线路多旋翼无人机智能巡检研究[J]. 中国设备工程,2020(2):192-193

[8]　赵爽,李学军,刘涛,等. 基于大比例尺航空影像共面约束条件的相机自检校方法[J]. 测绘学报. 2017,46(1):98-106

[9]　杨必武,郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报,2005(3):269-274

[10]　Brown D C. Close-range Camera Calibration[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,1971,37(8):855-866

[11]　畅毅,房建雪,周敏,等. PPK技术作业模式与精度分析[J]. 全球定位系统,2009,34(1):33-37

[12]　李峰,杨海东,张建刚,等. 利用GPS辅助空三的高原大比例尺航摄测图研究[J]. 测绘通报,2012(8):21-23

第一作者简介：孙强（1978—），硕士研究生，高级工程师，主要从事电网工程技术研究和工程管理工作。