

高山风电风机塔筒倾斜测量方法探究

李小雁 双继争 林晏 赵亮亮

湖南科创电力工程技术有限公司 湖南 长沙 410000

[摘要]随着风力发电机装机量屡创新高,风致疲劳等原因引起的风机基础损伤逐渐引起了人们的关注。这类现象将导致塔筒产生较大摇晃倾斜,严重时甚至造成倒塌、风机叶片掉落等安全事故。论文以某风电场2MW重力式风机机组为研究对象,探究基于角度交会的前方交会方法,并通过误差精度分析以及最终实测数据对比,验证该方法能较好的服务于风电场特殊环境条件下的塔筒倾斜测量。

[关键词]风致疲劳; 风机塔筒; 倾斜测量

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2020.02.733

1 概述

目前国内风机普遍存在因风致疲劳引起风机塔筒和基础脱离裂隙、混凝土冒浆、钢筋断裂、下法兰脱落进而引发风机塔筒倾斜的现象^[1, 2]。风机表层混凝土与钢筋间出现明显裂缝,这种情况裂缝因现场有防水层,往往不易被观测^[3]; 风机周边出现泛浆,这种情况表明风机塔筒出现较大松动摇晃,风荷载作用下基础对周边混凝土造成磨损^[3]; 风机穿筒钢筋发生剪断及周边混凝土破碎,这种情况损伤危害极大。风机下法兰区混凝土磨碎,形成空腔,这种情况损伤危害极大。

当风机运行时,风机受力状态受风荷载、风机机组自重荷载等因素影响极其复杂。风力发电机组在运行过程中,作用在塔筒顶部的轴向压力会产生对塔筒各截面的弯矩,塔筒在外部荷载的作用下极易发生形变和位移,当外部荷载很大时,弯矩增大会导致塔筒某一截面超出其屈服极限,使得塔筒损坏,甚至出现倒塔^[3]。另外,风机塔筒顶端过大的位移,也会引起风机机组的激烈振动,最终导致机组不能正常发电^[4-6]。因此,定期的塔筒倾斜位移监测就显的十分必要。

2 基于角度交会的前方交会方法和误差精度分析

高山风电风机机组塔筒倾斜测量周边环境限制因素主要体现在以下三个方面: 1) 风机机组多沿山脊线呈线性,独立山头分布,极难共用位移监测控制点,少数共用情况下也极易发生控制点、风机塔筒三点共线现象,控制点、风机塔筒组成几何图形强度弱; 2) 风机平台半径小,采用风机平台布点进行倾斜测量时,风机机头测量数据的获取需在极大的竖直角观测条件下进行; 3) 风机塔筒外侧多数情况下严禁攀爬、严禁安装照准设备,测量塔筒左右边线切线角度时,竖直角越大,照准误差越大。

2.1 基于角度交会的前方交会方法

截至当前,面向高层建筑物的倾斜测量方法较多,但受周边环境因素影响大多不适宜高山风电机组塔筒倾斜测量。本文基于大量文献,针对实际的风机机组倾斜测量检测工程,探究可采用基于角度交会的前方交会方法。该方法大致操作步骤如下:

1) 风机平台上选定3个位置埋设平面控制点标志。选点埋石需满足以下要求: a, 埋石应尽量设置在平台上远离风机

机组的位置(通常在25~35米之间); b, 相邻控制点与风机塔筒中心组成的夹角尽量满足在30°~150°之间)。

2) 测量平面控制点AB、BC间距离,以及∠ABC,利用罗盘仪测定BA边方位角作为BA边的坐标方位角,利用测量获得距离、角度数据建立该风机平台独立平面控制坐标系统,计算A、B、C三点坐标。

3) 通知风电场升压站值班人员关停当前倾斜监测风机,利用风速仪、温度计获取当前状态风速、风向、气温等气象数据,记录当前状态风机机头朝向。

4) 风机处于停运状态后,控制点A处设站,B处定向,检测风机固定位置(风机塔筒下侧1处、风机塔筒上侧一处,所选位置宜在风机塔筒筒节衔接处便于观测)塔筒左侧、右侧切线角度数据。同理在风机B、C处设站获取固定位置塔筒左侧、右侧切线角度数据。

5) 内业数据处理: 将风机固定位置塔筒左侧、右侧切线角度归化至通过风机塔筒中心的角平分线上,然后利用前方交会公式,可分别计算A、B点分别设站时的不同交会位置的交会坐标(塔筒中心位置)以及B、C点分别设站时不同交会位置的交会坐标,同一固定位置两次获取的交会坐标取均值作为最终成果,结合塔筒检测段长度,即可求得当前状态下风机塔筒的瞬时倾斜值。

2.2 误差精度分析

已知A、B、C点坐标,通过测量固定位置塔筒左侧、右侧切线角度,获取归化至通过塔筒中心的角平分线即可求出P点坐标,然后求平均值作为该固定位置本次倾斜测量中心坐标。

显然

$$\begin{cases} x_p = x_A + AP \cdot \cos \alpha_{AP} = x_B + BP \cdot \cos \alpha_{BP} = x_C + CP \cdot \cos \alpha_{CP} \\ y_p = y_A + AP \cdot \sin \alpha_{AP} = y_B + BP \cdot \sin \alpha_{BP} = y_C + CP \cdot \sin \alpha_{CP} \end{cases}$$

因此

$$\begin{cases} x_p = \frac{x_A \cot b_1 + x_B \cot a + y_B - y_A}{2 \cot a + 2 \cot b_1} + \frac{x_B \cot c + x_C \cot b_2 + y_C - y_B}{2 \cot b_2 + 2 \cot c} \\ y_p = \frac{y_A \cot b_1 + y_B \cot a + x_A - x_B}{2 \cot a + 2 \cot b_1} + \frac{y_B \cot c + y_C \cot b_2 + x_B - x_C}{2 \cot b_2 + 2 \cot c} \end{cases}$$

下面我们不妨先研究三角形ABP中,∠B增加微小量dB后,对P点位置的影响有多大? B点向AP作垂线,垂足为N。计

$\angle NBP$ 为 β 。

显然有 $NP = NB * \tan \beta$ ，两边全微分有 $dNP = \tan \beta dNB + NB \sec^2 \beta d\beta$ 。 $\angle A$ 保持不变时 NB 不会改变，即 $dNB = 0$ ， $\angle B$ 的增量 dB 与 $d\beta$ 相同，亦即 $d\beta = dB$ ，所以：

$$dNP = NB \sec^2 \beta d\beta = \frac{BP}{\sin P} d\beta$$

上式表明： $\angle B$ 增加微小量 dB 后， P 点位置将改变 $\frac{BP}{\sin P} d\beta$

，同理 $\angle A$ 增加微小量 dA 后， P 点位置将改变 $\frac{AP}{\sin P} d\beta$ ，此时 P 点点位误差满足

$$m_p = \sqrt{\left[\frac{AP}{\sin P}\right]^2 m_A^2 + \left[\frac{BP}{\sin P}\right]^2 m_B^2} = \frac{\sqrt{AP^2 m_A^2 + BP^2 m_B^2}}{\sin P}$$

假定全站仪的水平角标称精度为 m_α ，则 $m_A^2 = m_B^2 = 2m_\alpha^2$ ，代入上式可得：

$$m_{p(ABP)} = \sqrt{2} m_\alpha \frac{\sqrt{AP^2 + BP^2}}{\sin P}$$

在三角形 ABP 和三角形 BCP 中，由前述部分我们可以知道， P 点坐标取三角形 ABP 中计算结果与三角形 BCP 中计算结果的平均值，则

$$m_p = \sqrt{m_{p(ABP)}^2 + m_{p(BCP)}^2}$$

可见，为了减小塔筒中心点坐标中误差，需要注意两点：1， $\angle P$ 最好接近 90° ，条件不允许情况下，尽量满足处于 $[75^\circ, 105^\circ]$ 范围内；2，风机下侧塔筒水平角测量在竖直角较小条件下进行，塔筒底端风机摆动微弱、照准误差较小，观测数据质量较好。风机上侧塔筒水平角测量在竖直角较大条件下进行，塔筒顶端风机摆动明显、照准误差较大，观测数据质量较差，故建议风机上侧塔筒水平角测量尽量在无风或者弱风条件下进行，以便减小照准误差。

3 工程算例与分析

3.1 风电场概况

某风电场风机基础设计级别为 I 级，桩基安全等级为一级，设计使用年限为 50 年。本工程采用远景能源科技有限公司生产 25 台 2MW 重力式风机发电机组，25 台风机塔筒高度 80m 左右，分布于场内不同位置山丘顶部。

3.2 风机塔筒倾斜测量结果

本项目风机塔筒倾斜测量采用徕卡 TCRA1201+R1000 全站仪，仪器测角精度标称精度： $\pm 1''$ ，计量检测研究院检测测角精度 $\pm 0.7''$ 。

采用基于角度交会的前方交会方法，对风电场内 3#、13#、22# 风机分别进行同一时间重复观测，所得到的结果与初始观测倾斜度存在一定的偏差。其中偏差最小为 13# 风机倾斜量偏差 9mm，倾斜度偏差 0.15%，偏差最大为 3# 风机倾斜量偏差 15mm，倾斜度偏差 0.25%，平均三台风机倾斜度平均偏

差 0.21%。风机塔筒设计允许的倾斜限差 5%，三台风机倾斜度平均偏差占风机塔筒设计允许的倾斜限差不足 1/23，测量数据能够较好满足风机塔筒倾斜测量相应的测量数据质量要求。

采用基于角度交会的前方交会方法，某风点场 9 月份对 4 月份相同风机进行第 3 次、第 4 次风机塔筒倾斜测量，检测结果如下：1) 本次测量塔筒倾斜度均值较上一期数据平均变化量分别为 0.12‰、0.09‰、0.16‰，表明观测周期内 3 台风机塔筒无明显倾斜现象发生；2) 本次测量过程中 3#、13# 风机风速较上一次明显降低，查看其风机倾斜检测数据不难发现对应塔筒倾斜检测数据虽变化量较小，但均呈现出减小趋势，这也进一步验证风机在大风时候风机塔筒存在微弱摆动这一现象。

4 结语

本文从理论和实践两个方面出发，探究了采用基于角度交会的前方交会方法，对某风电场风机塔筒倾斜数据进行测量，分析其获取的测量数据得到以下结论：

(1) 对某风电场多台风机塔筒倾斜测量检测结果表明，采用基于角度交会的前方交会方法能有效地检测出风机塔筒的倾斜量及倾斜度。

(2) 采用基于角度交会的前方交会方法，由于风机塔筒外壁无法安装观测标志，风机本身存在风致摆动等因素，照准误差较大，测量时宜尽量选择天气晴朗、弱风或者无风条件下进行。

(3) 采用基于角度交会的前方交会方法，测角误差主要影响部分在照准误差，这部分因素受风电场特殊环境影响极难改变，另一方面测量误差随着交会夹角的增大明显减小，故在测量过程中，应尽量保持交会角度在 90° 左右，这样简易的操作便会对测量数据质量产生极大的提高。

(4) 风机塔筒倾斜测量结果能为风机损伤情况提供一定的参考价值，后期对其进行研究时，可考虑分高度分层测试各塔筒筒节衔接处位移量，这对于发现风机塔筒各筒节衔接处的安全隐患或具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 刘马军. 我国风力发电发展浅析[J]. 山东工业技术. 2016. (16): 168

[2] 马德云, 宋佳, 南锟等. 某新型风电机组塔筒倾斜及安全检测鉴定[J]. 特种结构. 2014. 31(05): 34-37+43

[3] 廖继彪. 风机塔筒倾斜测量方法和重力二阶效应研究[D]. 湖南: 湖南科技大学, 2017

[4] 马人乐, 黄冬平. 风电结构亚健康状态研究[J]. 特种结构. 2014. 31(4): 1-4

[5] 康明虎. 某风电场风机基础故障分析及处理[J]. 可再生能源. 2014. 32(6): 809-813

[6] 何绍福, 杨争龙. 圆形高大构筑物的倾斜观测[J]. 露天采矿技术. 2013. (03): 83-84