

基于随机抽样一致性算法的风电机组塔筒倾斜度检测方法

雷阳¹, 兰维², 石超¹, 张中泉², 刘勇钊³

(1. 杭州职业技术学院 友嘉机电学院, 杭州 310018; 2. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030; 3. 浙江省工程物探勘察院, 杭州 310005)

摘要:随着风电行业的快速发展,由于设计缺陷、制造问题以及检查和维护不充分导致风电事故频繁发生。机组倒塌是典型的事故之一,检测塔筒倾斜度是避免机组倒塌事故的重要措施。为解决利用最小二乘法无法剔除检测数据的局外点和噪声而导致检测精度低的问题,提出了一种基于随机抽样一致性的算法,可以剔除不良数据,并具有较强的抗噪声和异常点干扰能力。依托甘肃瓜州某风电场进行试验,结果表明,该算法能够较好地应用于塔筒倾斜度检测。

关键词:风电机组;塔筒;倾斜度;随机抽样一致性算法;最小二乘法;精度

中图分类号:TK 83 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2018)10-0004-03

0 引言

风能是一种安全、清洁、可再生的新能源,发展风能等新能源成为世界各国的共识^[1]。近几年,在政策引导和价格补贴等手段的推动下,全球风电快速发展。截至2017年年底,全球风电累计装机容量已经达到539.58 GW,其中,中国大陆风电装机容量达到188.23 GW^[2]。

近年来,随着风电行业的快速发展,由于设计缺陷、制造问题以及检查和维护不充分导致风电事故频繁发生。典型的事故有风电机组倒塌、着火、超速飞车、叶片断裂、频繁脱网等^[3-5]。风电机组主要部件包括塔筒、叶片、机舱、轮毂、发电机、齿轮箱等^[6],其中塔筒起到支撑整个机组的作用,因此,当发生塔筒倾斜、折断等导致机组倒塌时,由此引起的经济损失是巨大的。塔筒安装完毕后,后期对它的检测、监测是避免事故发生的一个重要措施^[3,7]。塔筒倾斜度的检测是塔筒检测的一项重要指标,通常利用全站仪等设备对塔筒进行数据采集,然后利用各类科学计算方法对数据进行处理、计算,从而得出塔筒倾斜度,最后参照标准判断是否合格。

1 测试背景与方法

1.1 测试地点与设备

本研究所使用的数据均采集自甘肃省酒泉市瓜州县某风电场,共采集到8台金风GW82/1500型风

电机组的塔筒倾斜度数据。数据采集设备为徕卡TCA2003全站仪,采集时间为2018年3月15—18日,累计4 d。

1.2 测试流程

(1)以风电机组为坐标原点,分别在120°夹角位置均布3个基准点,且基准点距离风电机组1.5D~2.0D(D为风电机组塔筒的高度),并形成闭合导线点网。

(2)测量时将仪器架设在基准点上,使用极坐标法对风电机组塔筒顶部和底部两个位置进行观测。其中底部观测点为基础环与第1节塔筒连接沿处,顶部观测点为机舱与塔筒交界处。

(3)根据三点圆的数学原理,计算得出塔筒顶部和底部圆心及其偏差,利用相关公式得出倾斜度。

为保证结果的准确性,在每个基准点至少对塔筒不同位置进行2次以上观测。观测时遵循以下原则:(1)观测时采用独立的坐标系统;(2)根据平面控制测量要求观测;(3)严格按GB 50026—2007《工程测量规范》和JG J8—2007《建筑变形测量规范》的要求,始终遵循先控制后测量原则,做到每次测量成果均符合限差要求;(4)观测时环境条件基本一致。

1.3 利用最小二乘法拟合圆心坐标

测试完成后,采集到的塔筒倾斜度观测数据点分布情况如图1所示。传统方法是使用最小二乘法对塔筒倾斜度数据进行拟合,从而得到圆心坐标。

假设利用最小二乘法所拟合得到的圆曲线方程可表示为:

$$R^2 = (X - A)^2 + (Y - B)^2, \quad (1)$$

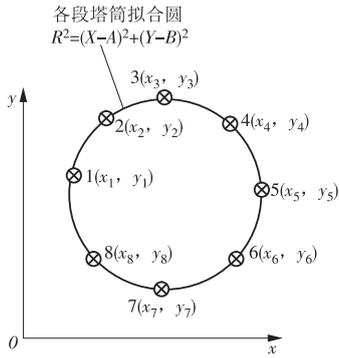


图 1 采集到的数据点分布示意

式中: R 为拟合圆的半径; X 为数据在 x 轴上的坐标值; Y 为数据在 y 轴上的坐标值; A 为拟合圆心在 x 轴上的坐标值; B 为拟合圆心在 y 轴上的坐标值。

令 $a = -2A, b = -2B, c = A^2 + B^2 - R^2$, 可得到圆方程

$$X^2 + Y^2 + aX + bY + c = 0, \quad (2)$$

求出参数 a, b, c , 即可求出圆心半径参数: $A = -a/2, B = -b/2, R = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}$ 。

测试完成后得到样本集 $(x_i, y_i), i \in (1, 2, 3, \dots, N)$, 点 (x_i, y_i) 到圆心的距离记为 d_i ,

$$d_i^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2, \quad (3)$$

那么, 点 (x_i, y_i) 到圆的距离的平方和与半径平方和之间的差可表示为

$$\delta_i = d_i^2 - R^2 = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - R^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c, \quad (4)$$

令 $P(a, b, c)$ 为 δ_i 的平方和

$$P(a, b, c) = \sum \delta_i^2 = \sum (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2, \quad (5)$$

求参数 a, b, c , 使得 $P(a, b, c)$ 的值最小。

对式(5)进行求偏导, 可得到极值点, 比较所有极值点, 最后得到最小值。

$$\frac{\partial P(a, b, c)}{\partial a} = \sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)x_i = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial P(a, b, c)}{\partial b} = \sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)y_i = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial P(a, b, c)}{\partial c} = \sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0. \quad (8)$$

解上述方程组, 令 $C = (N \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i), D = (N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i), E = N \sum x_i^3 + N \sum x_i y_i^2 - \sum (x_i^2 + y_i^2) \sum x_i, F = (N \sum y_i^2 - \sum y_i \sum y_i), G = N \sum x_i^2 y_i + N \sum y_i^3 - \sum (x_i^2 + y_i^2) \sum y_i$, 可得解

$$Ca + Db + E = 0, \quad (9)$$

$$Da + Fb + G = 0, \quad (10)$$

$$a = \frac{GD - EF}{CF - D^2}, \quad (11)$$

$$b = \frac{GC - ED}{D^2 - FC}, \quad (12)$$

$$c = \frac{\sum (x_i^2 + y_i^2) + a \sum x_i + b \sum y_i}{N}, \quad (13)$$

即可求得 A, B, R 的估计拟合值。

利用最小二乘法可准确拟合出圆心坐标, 但当出现测试人员操作失误、测试设备异常等情况时, 数据点可能存在异常点(如图 2 所示), 此时利用最小二乘法拟合圆心点坐标, 所得值可能跟实际情况存在较大差异, 最终导致检测的精度较低。

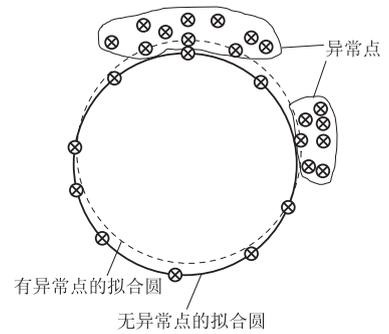


图 2 存在异常点的数据集

为解决传统利用最小二乘法存在异常点导致检测精度低的问题, 本文提出一种基于随机抽样一致性的风电机组塔筒倾斜度检测方法。

1.4 随机抽样一致性算法

随机抽样一致性(RANSAC)算法^[8]在处理数据时具有较大优势, 其特点是从一组包含“局外点”的检测数据集中, 通过迭代的方式来估计数学模型的参数。随机抽样一致性的基本假设有: (1) 数据由“局内点”组成; (2) “局外点”不能适应已知模型的数据; (3) 其他数据为噪声数据。图 3 为随机抽样一致性算法的基本流程^[9-10]。

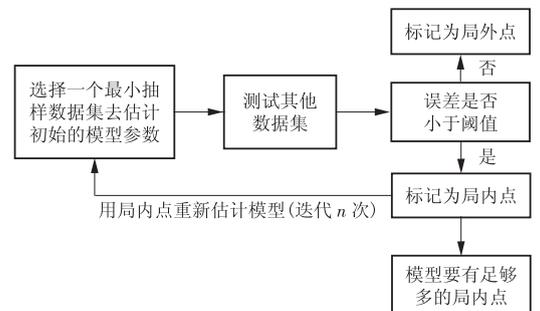


图 3 随机抽样一致性算法基本流程

随机抽样一致性算法需确定的参数有: 判定局内点的阈值 t 、迭代次数 n 、使得模型合理的局内点个数 m_x 。在估计模型的参量时, 用 p 表示迭代过程

中从数据集内随机抽取的点均为局内点的概率,用 q 表示每次从数据集中抽取一个局内点的概率。

$$q = m_x / M, \quad (14)$$

式中: M 为数据集的个数。

假设估计模型时需要 m 个点,则 q^m 表示为 m 个点都为局内点的概率;那么 $(1 - q^m)$ 则表示至少一个点是局外点的概率。 $(1 - q^m)^n$ 表示算法不会选择到 m 个点都是局内点的概率,其等于 $(1 - p)$,即表示 $1 - p = (1 - q^m)^n$ 。对该公式取对数可得到迭代次数 n 的公式

$$n = \frac{\lg(1 - p)}{\lg(1 - q^m)}. \quad (15)$$

阈值 t 一般靠经验选取,其直接影响局内、局外点的判断^[10-11]。假如阈值 t 选择较小,算法太敏感,导致放弃部分有效点;若阈值 t 选择较大,算法不敏感,对有效数据可能造成误判。本文使用平均绝对偏差 F 来估计数据的方差,以解决该问题。若选取的数据子集为 y_i ,则表达式为

$$F = \text{Average}_i(|y_i - \text{Average}_j(y_j)|), \quad (16)$$

式中: Average_i 为求数组中的均值函数; $|\cdot|$ 为求绝对值的符号; i 和 j 分别为数据子集的位置。

阈值 t 表示为测试数据的平均绝对偏差,再用模型去测试剩余的数据,假如数据点到圆的距离小于 t ,则认为该点是局内点,反之就是局外点。已有学者验证了随机抽样一致性比最小二乘法具有较好的可靠性和稳定性^[10,12],本文不再赘述。

2 结果与分析

利用随机抽样一致性算法计算得到每台风电机组塔筒上下圆心坐标,再根据建筑物基础的倾斜值 S 的计算公式,可计算出塔筒的倾斜度。

$$S = \frac{\Delta L}{H}, \quad (17)$$

式中: ΔL 为位移量; H 为监测圆心点面间距。

此次试验的风电机组塔筒高度为 67.8 m,通过式(17)可计算出各风电机组塔筒的倾斜率,见表 1。

表 1 各风电机组塔筒的倾斜率

塔筒编号	圆心位置	X(北坐标)	Y(东坐标)	上下圆心偏移量	圆心面高差	倾斜率	倾斜方向
E2-7F	底部圆心	-126.7077	-36.5786	0.0523	67	0.000780	40°43'56"
	顶部圆心	-126.6736	-36.5390				
E3-5F	底部圆心	19.9369	-91.2730	0.0827	67	0.001234	110°45'38"
	顶部圆心	20.0142	-91.3023				
E4-9F	底部圆心	-20.9642	-94.2195	0.0669	67	0.000999	81°34'45"
	顶部圆心	-20.8980	-94.2097				
E6-10F	底部圆心	32.4172	-90.3357	0.0741	67	0.001106	103°54'18"
	顶部圆心	32.4891	-90.3535				
F2-5F	底部圆心	131.2232	-59.7919	0.0800	67	0.001194	328°4'41"
	顶部圆心	131.1809	-59.7240				
F3-1F	底部圆心	-131.8488	-9.2219	0.0137	67	0.000204	258°36'28"
	顶部圆心	-131.8622	-9.2246				
F4-2F	底部圆心	-103.5699	-57.1016	0.0342	67	0.000511	23°25'6"
	顶部圆心	-103.5563	-57.0702				
F6-7F	底部圆心	-55.5419	-76.7902	0.0546	67	0.000814	47°18'9"
	顶部圆心	-55.5018	-76.7532				

从表 1 可看出,塔筒倾斜率最大的是 E3-5F 风电机组,达 0.001234。GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》标准规定,多层和高层建筑的总体倾斜率应小于 0.0025(60 m < 自室外地面算起的建筑物高度 ≤ 100 m),由此可见,此次测得的各风电机组塔筒倾斜值均符合规范要求。

虽然此次检测的 8 台风电机组倾斜率均合格,但理论上塔筒的变形是动态的,故建议在恶劣天气运行期间,需再次对各风电机组进行监测,比较风电

机组前后倾斜率是否稳定,保证风电场的安全、稳定运行。

3 结论

本文依托甘肃瓜州某风电场试验数据,利用平均绝对偏差方法剔除异常点,并利用随机抽样一致性算法计算每台风电机组塔筒上下圆心坐标。结果显示,基于随机抽样一致性算法能够较好地应用于风电机组塔筒倾斜度检测中。(下转第 18 页)

通过查阅文献资料,该型号 PT 与文献[8]中故障 PT 为同一厂家生产的同型号产品,并且多次出现 PT 匝间短路事故,威胁机组安全稳定运行,这更加表明 PT 选型、质量的重要性。

(2)在机组检修期间,按照 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》要求^[9],开展发电机出口封闭母线、PT 的检查和试验工作^[10]。

(3)带电局部放电测试作为一种有效的非电量绝缘测试手段,对于判断 PT 内部是否存在绝缘缺陷有辅助作用,可考虑增加此类试验项目。

(4)定期对发电机出口 PT 开展巡检和红外线成像监测工作。

(5)发电机出口 PT 二次回路接线时要反复核对,避免出现误接线。新增加的负荷在设计之初必须仔细核实有无容量越限的情况。

5 结束语

发电机出口 PT 的匝间短路故障往往会引起机组保护动作,甚至造成非停事故,文中通过对 PT 匝间短路等效电路的分析计算,得出匝间短路会引起故障相等效阻抗明显降低这一结果,可作为增设保护逻辑的有效判据。发电企业应结合预防措施,加强 PT 设备的选型、订货、验收、投运以及日常维护、检修、试验工作。

参考文献:

[1]王振岳,陈伟,鹿海成,等. 电子式与电磁式互感器的比

(上接第 6 页)

参考文献:

[1]费智,符平. 我国风电发展的态势分析与对策建议[J]. 科技进步与对策,2011,28(10):65-68.

[2]徐涛. 2017 年全球风电装机统计[J]. 风能产业,2018(3):51-57.

[3]庞渊. 风电机组典型事故及预防措施分析[J]. 中国高新技术企业,2015(29):123-125.

[4]叶希,鲁宗相,乔颖,等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):11-17.

[5]王明军,高原生,梅国刚,等. 风电机组重大事故分析(四)[J]. 风能,2015(1):46-52.

[6]BURTON T. 风能技术[M]. 北京:科学出版社,2014.

[7]桑远. 基于声发射检测的风电塔筒动态监测技术研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.

[8]FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Readings in Computer

较及在智能电网中的应用[J]. 华电技术,2012,34(2):50-52.

[2]南东亮,孙谊焮,冯小萍,等. 一起由 PT 故障引起基波定子接地保护动作的分析[J]. 智能电网,2016,4(5):458-462.

[3]陈俊,陈佳胜,张琦雪,等. 发电机机端电压互感器匝间短路导致定子接地保护动作分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(10):143-147.

[4]于龙滨,姚颖锋. 发电机出口 TV 匝间短路故障分析[J]. 东北电力技术,2014(12):11-13.

[5]赵森,赵文炎,高自伟,等. 电压互感器一次绕组匝间短路引起发电机运行异常的分析及处理[J]. 黑龙江电力,2014,36(2):160-162.

[6]广东电网公司电力科学研究院. 电气设备及系统[M]. 北京:中国电力出版社,2014:323-324.

[7]谭喜堂,吕佩佩,朱琴跃,等. 单相双绕组变压器匝间短路故障诊断[J]. 电力系统及其自动化,2015,37(1):73-74.

[8]胡越冬. 发电机出口电压互感器(PT)匝间短路故障分析[J]. 贵州电力技术,2016,19(5):49-53.

[9]电力设备预防性试验规程:DL/T 596—1996[S].

[10]郭晓锋. 同产 300~1 000 MW 发电机出口 PT 试验方法介绍[J]. 河南电力技术,2017(3):11-13.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

马云飞(1991—),男,河南郑州人,助理工程师,工学硕士,从事一次高压电气试验工作(E-mail:dthzsmf@163.com)。

Vision,1987,24(6):726-740.

[9]周春霖,朱合华,李晓军. 随机抽样一致性平面拟合及其应用研究[J]. 计算机工程与应用,2011,47(7):177-179.

[10]谢珊珊,王哲强,黄河,等. 随机抽样一致性算法在激光光谱中的应用研究[J]. 激光技术,2017,41(1):133-137.

[11]魏英姿,刘晓莉. 基于随机抽取一致性的稳健点云平面拟合[J]. 北京工业大学学报,2014,40(3):400-403.

[12]HAST A, NYSJÖ J, MARCHETTI A. Optimal RANSAC: Towards a repeatable algorithm for finding the optimal set [J]. Journal of Wscg,2013,21(1):21-30.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

雷阳(1989—),男,江西九江人,工程师,工学硕士,从事新能源技术和机械设计与制造方面的研究(E-mail:leiyangcn@126.com)。