

# 基于简易声源定位法的风力发电机组 塔筒基础松动故障诊断

王子顺

(明阳智慧能源集团股份公司, 广东中山 528400)

**摘要:**以出现异响的某风力发电机组为研究对象,采用双通道振动检测仪器获取运行中产生的振动脉冲信号,根据信号传递的顺序运用简易声源定位法进行分析,将振动异响的频率与塔筒摆振频率进行比对,进行振动测试以确认振动异响的根源。通过综合振动分析和测试,最终确定了该风力发电机组振动异响的确切根源为塔底相关部位。采用简易声源定位法成功定位了故障,为风力发电机组的改进设计和运行稳定性提高提供了实际可行的技术路径。

**关键词:**风力发电机组; 声源定位; 固有频率; 基础环

**中图分类号:** TM614; TH17

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-086X(2024)03-0189-05

**DOI:** 10.19806/j.cnki.fdsb.2024.03.011

## Diagnosis of Tower Foundation Loosening Fault in WTGS Based on Simple Sound Localization Method

Wang Zishun

(Mingyang Smart Energy Group Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong Province, China)

**Abstract:** Taking a wind turbine generator set (WTGS) with abnormal noise as the research object, vibration pulse signals generated during operation were obtained through using a dual-channel vibration detection instrument, and analyses were conducted according to the sequence of signal transmission based on simple sound localization method. A comparison between the vibration frequency of abnormal noise and the oscillation frequency of tower was carried out, and the source of abnormal vibration was investigated by vibration tests. Through comprehensive analysis and test for vibration, it is finally confirmed that the exact vibration source with abnormal noise is at the tower bottom of WTGS. The fault has been found successfully with simple sound localization method, and this can provide a practical and feasible technical way for the design optimization and operation stability improvement of WTGS.

**Keywords:** WTGS; sound localization; natural frequency; foundation ring

振动异响问题是风力发电机组日常运行过程中常见的问题,可能产生不可控的设备损坏、功率下降和安全风险。准确确定振动根源并及时消除振动异响,可确保机组稳定性和可靠性,提高发电效率,进而最大限度地利用风能资源。解决振动异响问题还可以降低维修成本、延长设备寿命。因此,有必要深入研究出现异响的原因,以制定有效修复方案提升机组的运行质量。

某风力发电场的1.5 MW双馈风力发电机组在首个冬季并网后,启停机时出现了“咚咚”声的

振动异响。尽管进行了多次尝试以查找振动异响的根源,但问题的来源仍未被成功确定。这一问题在冬季尤为显著,并且与温度变化直接相关。振动异响可能导致机组塔筒结构疲劳<sup>[1]</sup>、材料损伤和裂纹产生等问题,影响风力发电机结构的稳定性,甚至可能引发不可预测的塔倒等严重事故。

针对风力发电机组运行过程中出现振动异响的问题,很多研究者进行了广泛分析。在对塔筒固有频率进行分析的过程中,曾梦伟等<sup>[2]</sup>发现,风力发电机组塔顶质量对整体结构的固有频

**收稿日期:** 2023-07-31; **修回日期:** 2023-08-18

**作者简介:** 王子顺(1990—),男,工程师,从事旋转机械故障诊断工作。

E-mail: wzs20201018@aliyun.com

率具有显著影响,增加塔顶质量会导致固有频率降低。此外,地基土壤的刚度也会对结构的动力特性产生重要影响。刚度增加会使固有频率快速上升,但当达到一定刚度后,固有频率增加速度逐渐减缓。王佼佼等<sup>[3]</sup>的研究表明,当风力发电机组叶轮转动 1 倍频率与基础及塔筒整体固有频率上限值非常接近时,容易发生共振现象。胡仕明<sup>[4]</sup>的研究发现,振动异响源包括叶片、轮毂、主轴承、齿轮箱、发电机和偏航刹车器等部位。此外,振动异响会呈现出“清脆”和“沉闷”2 种不同的声音特征。

为了分析该风力发电机组振动异响问题的来源和传播方式,在各节塔筒壁上布置振动加速度传感器,采集振动信号。研究脉冲信号在塔筒传播过程中的衰减特性。通过对比时域波形中信号的先后顺序,可以判断振动的传递路径。这种研究方法有助于深入研究振动异响问题,并且可以作为制定修复措施的参考。

## 1 诊断要素

声源定位主要依据振动信号的频率、幅度和相位这 3 个基本属性,这些属性是根据物理学定义的振动三要素<sup>[5]</sup>得出的。频率是指单位时间内振动的重复率或次数。幅度表示物体离开平衡位置时的最大位移,可以用振动幅度大小反映出的振动强弱来描述,同时也可以用于振动的位移、速度和加速度等参数来描述,但是研究内容主要聚焦于振动加速度,因为它能更直观地反映冲击力的大小<sup>[6]</sup>。相位用于比较不同事件之间的时间差,或表征振动在时间先后关系或空间位置关系上的差异。在本文中,关注的是不同振动信号上相同事件的相位差,也就是不同部件或不同位置的振动在同一时间点上的相位关系。

现场除了对塔筒的振动异响源进行了排查,还对风力发电机组的其他潜在振动异响源进行了详细排查。经过仔细调查,排除了变桨系统、偏航系统和轮毂整流罩引起振动异响的可能性。

## 2 振动测试

为了捕捉风力发电机组塔筒在振动异响时产生的振动信号,使用了双通道便携式振动仪器<sup>[7-8]</sup>。该仪器具备双通道(分别对应 CH1 和 CH2)实时采集数据、快速和精确计算的数字信号处理器(DSP)处理芯片,以及高精度测量的 24

位模数转换器(A/D),测量的数值范围为 0~1 000 倍的重力加速度,测量的速度范围为 0~25 000 mm/s(对应 0~2 500 mm)。同时,仪器支持频域和时域测量,并且具备自动长时间时域波形采集和高速精确数据采集功能。仪器还具有 1 GB 稳定闪存,可以提供海量记录存储空间。

为了满足奈奎斯特定理的要求,并且确保准确捕捉风力发电机组塔筒在出现振动异响时产生的异常信号,进行了详细的参数设置。在时域波形采集方面,选择采样时间为较长的 60 s,以保证采集足够的数量。为了保证高频信号的准确采集,最大分析频率设置为 5 000 Hz,采样频率设置为 12 800 Hz,频率分辨率为 0.017 Hz<sup>[9]</sup>。对于频域谱分析,采用了汉明窗和一次线性平均的方法,并且设置了 50% 的重叠系数,以确保频谱分析结果的准确性和可靠性。通过这些科学合理的设置,能够最大程度地获取风力发电机组塔筒振动异响的相关信号,并且为后续的处理和解决提供有价值的技术支持。

### 2.1 故障复现

通过查阅涉事机组的历史运行维护记录发现,机组在运行至今并未更换过大部件,并且历次定期检查也没有发现异常情况。部分机组的振动异响问题始于并网后的第一个冬季,统计数据显示,在冬季温度低于 -15 ℃ 时,机组在起停机过程中出现了“咚咚”声的振动异响。

对机组进行了常规的振动检测,确定了测点的位置,同时现场对机组的其他动态和静态部件进行了测试和检查,得出以下结论:

(1) 在振动检测过程中,发现机组在启动时通常会出现 2 次异响,而在停机时通常会出现 1 次异响。通过人工听诊,初步确定异响的声音路径似乎从塔底自下而上传来。

(2) 通过利用变桨距调节的方式,改变桨叶与桨距角的位置,来实现功率的调节,同时未发现类似“咚咚”声这种特定的振动异响。说明在该工况下,不存在与转速和功率控制过程相关的振动问题。

(3) 当发生振动异响时,通过人的目视、听觉和触觉对风力发电机组偏航系统的各部件进行排查。在排查中,没有察觉到偏航制动器发出异响的迹象,同时目视观察也未发现微动位移或颤动现象。对于齿轮副和刹车盘的振动触感也没有明显异常。此外,还检查了机组的偏航残压,

结果显示偏航残压在正常范围内。通常情况下,如果偏航残压过大,会产生高频刺耳的尖锐声。另外,检查了液压站管路,未发现存在空气导致的异常情况,这也排除了冲击异响的可能性。

(4) 在进行轮毂排查时,未发现任何紧固件松动的迹象。具体来说,导流罩与轮毂、导流角支架之间的连接螺栓,以及导流架与角支架之间的连接螺栓都保持良好的紧固状态。此外,在机组运行时,未听到轮毂内发生“沉闷”的金属撞击声。

(5) 在叶片排查过程中,发现叶片的紧固件与定检时的刻度线一致,没有出现任何异常情况。当异响发生时,叶轮扫风声并没有异常。为了进一步排查,通过手动控制3个叶片,分别进行了反复独立变桨(排查过程覆盖了 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的变桨角度)。在这个过程中,未听到由叶片、变桨制动器或变桨轴承发出的异响,同时在机舱内并未听到由轮毂内传递出来的异响。

(6) 为了进行传动链的振动检测,使用了双通道便携式振动检测仪器,并且对传动链的主要部件(主轴轴承、增速箱和发电机)进行了3组振动信号的采集。测点方向包括水平方向、垂直方向和轴向。采样频率分别设定为12 800 Hz和25 600 Hz,采样时间分别为10.24 s和5.12 s。通过对采集到的数据进行详细分析,未发现传动链大部件振动信号方面出现明显异常。这表明传动链在振动方面的运行状态正常,进一步排除了传动链引起振动异响的可能性。

(7) 在机组进行急停测试时,当塔筒晃动时会听到异常的“咚咚”声。通过使用秒表计时,发现在8.99 s的时间内,出现了4次等间隔的异响,即塔筒的异响频率为0.44 Hz,与机组仿真的一

阶固有频率完全重合。这表明在急停测试中,塔筒的振动频率与机组的固有频率产生了共振,导致出现了振动异响。

## 2.2 声源定位

经初步排除机组传动链大部件和其他部件引起振动异响的可能性后,初步认定振动异响是由塔筒底部件及其相关紧固部件振动引起的。这种冲击振动在各层钢结构中传递,类似于低阻尼状态下的自由敲击。在传递过程中,机械应力<sup>[10]</sup>冲击声波信号必然产生延迟效应。因此,设想通过测试冲击声波的信号延迟效应来查找冲击噪声的信号来源,即声源定位。为了实施声源定位,在塔筒各段法兰分离面上下端分别布置测点,使用双通道便携式振动检测仪器通过长时域波形进行振动信号的采集。声源定位塔筒测点布置示意图见图1。

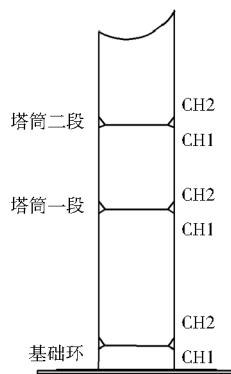


图1 声源定位塔筒测点布置示意图

通过在塔筒段各法兰分离面布置传感器,得到基础环、塔筒一段、塔筒二段的法兰分离面时域波形图,分别见图2至图4,时域波形图中的相关参数汇总见表1。

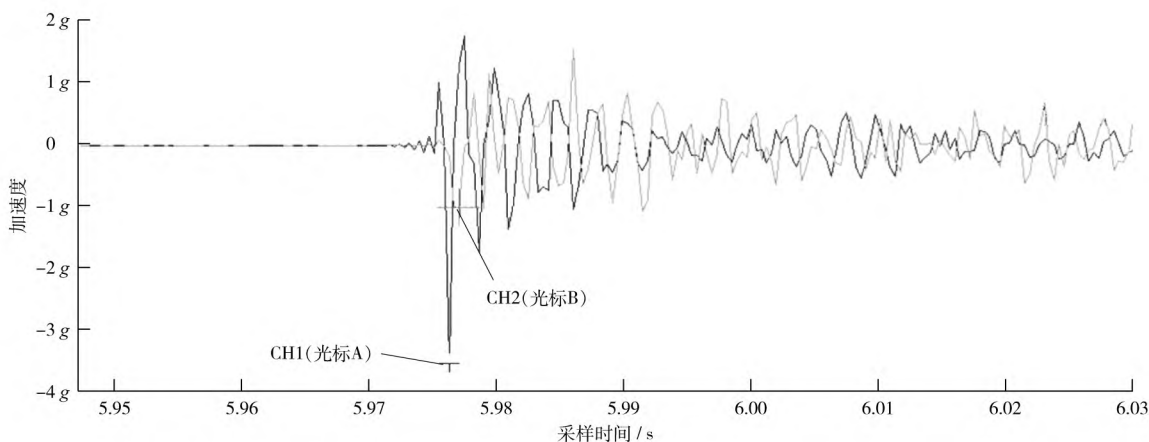


图2 基础环法兰分离面测点时域波形图

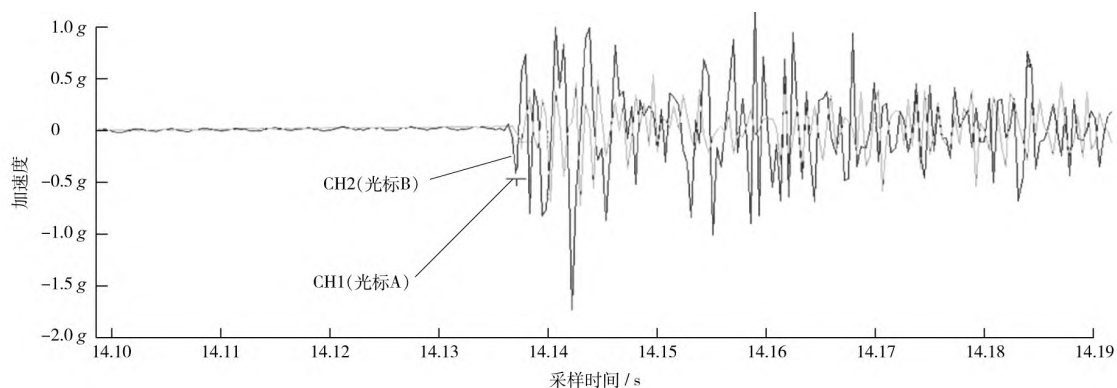


图 3 塔筒一段法兰分离面测点时域波形图

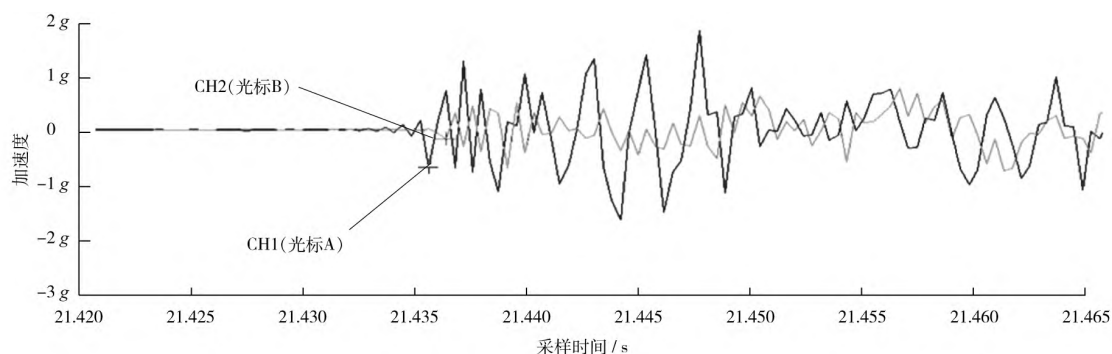


图 4 塔筒二段法兰分离面测点时域波形图

表 1 时域波形图中的相关参数汇总

位置	光标 A 坐标	光标 B 坐标	时间差/ms	振动频率/Hz	振动总值	真峰-峰值	尖峰系数
基础环	(5.976 s, -3.550 0g)	(5.977 s, -1.017 0g)	0.781	1 280	0.020 60g	2.641g	64.092
塔筒一段	(14.140 s, -0.479 6g)	(14.140 s, -0.116 5g)	0.391	2 560	0.020 63g	1.350g	32.721
塔筒二段	(21.440 s, -0.689 3g)	(21.440 s, -0.175 7g)	0.781	1 280	0.023 60g	1.592g	33.734

通过对表 1、图 2 至图 4 的分析,发现 CH1 测点的振动波形信号相对于 CH2 测点的振动波形信号存在信号超前的现象。这说明振动信号先传递到分离面下端的 CH1 测点,再传递到位于分离面上端的 CH2 测点。时间差表明了振动信号的传播方向是由下至上的,即可以推断冲击振动信号是从下方传递到上方的。这种观察对于理解振动传播和进行结构分析具有重要意义。

通常情况下,离振动源越远,振动信号的相位滞后时间越长。基础环处 CH1 测点的时域波形显示振动信号衰减过程更加规律且接近正弦波(见图 1)。然而,在塔筒二段法兰分离面的 CH1 和 CH2 测点的时域波形中,观察到非正弦波形且呈现无规律的衰减趋势(见图 4),表明这些位置的振动信号与振源之间的距离较远,存在信号传播过程的延迟效应。

### 3 结果分析

通过处理振动信号,使用声源定位原则精确确定了最早发出信号的位置,即距离振源最近的位置。

通过采取这些措施,能够更准确地确认塔筒异响的根源。针对风力发电机组塔筒偶尔出现异响的问题,振动信号的受干扰时域波形中可能含有其他瞬时脉冲信号,导致塔筒固有频率脉冲信号的频率和振幅能量较弱。因此,采用局部缩放功能来提取主要的频率特性,即塔筒固有频率。通过比较事件之间的时间差,即信号的时序关系,分析双通道振动信号传播路径的强度与距离,从而快速确认振动的传递路径,并且准确定位异响源。

通过对以上振动信号测试与分析,得出以下结论:振动异响冲击信号的频率为 0.44 Hz,与塔筒的一阶固有频率相匹配,并且振动传递方向是自下而上的。

基于以上分析,首先检查了塔筒基础环与钢筋混凝土之间的连接刚性是否存在松动情况,其次对塔筒各段法兰连接螺栓进行检查,确认其是否存在松动情况。

经过检查,发现塔筒基础环存在连接问题,同时对相关部件进行了加固。经过处理,振动异响在随后的冬季得到消除,机组的运行也恢复到



正常状态。

通过上述排查工作,成功确定了振动异响的根源,并且提供了相应的处理意见和数据支持,为后续的技术改造工作提供了重要的指导。

## 4 结语

通过简易声源定位法对风力发电机组塔筒松动故障进行诊断,确定了振动异响的部位,这种方法在实际工程应用中具有很大的可行性和实用性。主要结论如下:

(1) 通过实际测量获得塔筒一阶固有频率,再将实测的塔筒一阶固有频率与仿真结果进行对比,可以确认塔筒运行情况与设计值是否一致或存在偏离。

(2) 机械波的冲击振动会产生异响,这些异响以声波形式在塔筒内通过空气传播。筒内的结构和空间可能引起声音的反射、吸收和折射,从而影响声音的传播路径和特性,无法直接定位异响源。为了确定振动源的方位,采用逐步在机械部件上放置传感器的方法,捕捉不同位置的信号,并且根据振动波形在时间域内的先后次序进行判断。

(3) 通过相位分析观察信号的时间差和相位差,可以确定信号的传播路径。声源定位原则利

用不同传感器之间的时间差和相位差来计算声源位置,能够更准确地确定振动信号的传播路径和问题根源位置,进而实施有针对性的故障诊断。

## 参考文献:

- [1] 霍涛,童乐为,郭志鑫,等. 风力机钢塔筒结构风致疲劳分析方法研究[J]. 工程力学, 2023, 40(8): 77-89.
- [2] 曾梦伟,魏克湘,李颖峰,等. 大型风力机塔架固有频率分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(4): 30-33.
- [3] 王佼姣,施刚,石永久,等. 考虑不同边界约束条件下的风电机组塔架固有频率分析[J]. 特种结构, 2011, 28(5): 5-8, 108.
- [4] 胡仕明. 1.5 MW 双馈型风电机组异常响声分析[J]. 风能, 2014(6): 88-91.
- [5] 谭祥军. 从这里学 NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [6] 丁问司,卿涛. 凿岩机瞬态冲击动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 1-8.
- [7] 郑红,王鹏,方智文,等. 便携式双通道振动故障诊断仪: CN200710120842.0[P]. 2008-02-06.
- [8] 陈文戈,曾焕浪,李铭才,等. 便携式振动信号采集处理系统的研究与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2000(1): 20-23.
- [9] 郝建民. 采样定理与奈奎斯特准则的研究[J]. 遥测遥控, 1998(2): 12-20.
- [10] 赵转,李世强,刘志芳. 冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6): 84-89.
- [5] 林琳,郑坊平,侯召堂,等. 超超临界锅炉高温再热器管横向裂纹分析[J]. 铸造技术, 2017, 38(11): 2657-2660.
- [6] 冯砚厅,郑相锋,李中伟. 再热器联箱管接头失效分析[J]. 热加工工艺, 2008, 37(19): 130-131.
- [7] 师瑞霞. 12Cr1MoV 合金金元素作用及基体性质的研究[D]. 兰州: 甘肃工业大学, 2001.
- [8] 唐爱晖. 12Cr1MoV 主蒸汽管道材质损伤分析与寿命评估[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- [9] 国家能源局. 火力发电厂金属技术监督规程: DL/T 438—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高压锅炉用无缝钢管: GB/T 5310—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 刘凯. 转向架侧梁磁控高速 GMAW 焊接应力与变形的有限元分析[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [12] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] 董森. 焊接残余应力对结构极限强度影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [14] 国家能源局. 火力发电厂焊接技术规程: DL/T 869—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [15] 国家能源局. 火力发电厂焊接热处理技术规程: DL/T 819—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] 黄杨森. 基于 BP 神经网络的转子振动预警方法研究[J]. 发电设备, 2023, 37(3): 186-191.
- [6] 李红连,唐炬. 基于 PSO-SVR 的同步发电机励磁电流预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 188-194.
- [7] 李红连,唐炬,方红,等. 基于支持向量回归机的同步发电机励磁电流预测方法[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 274-276, 302.
- [8] 徐俊元,梁辰,何天磊,等. 基于 DCS 系统数据驱动的汽轮发电机转子绕组匝间短路缺陷检测[J]. 大电机技术, 2021(6): 15-21, 27.
- [9] 郭鹏,徐明,白楠,等. 基于 SCADA 运行数据的风电机组塔架振动建模与监测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 128-135.
- [10] 尹艳松. 基于 NSET 模型的高速列车轴温预测方法[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(12): 26-27, 30.
- [11] 黄杨森,刘云平,王勇,等. 汽轮发电机组转子振动预警方法研究[J]. 机械强度, 2023, 45(3): 541-547.
- [12] 林万德,刘雄,黄杨森,等. 一种工况参数的预测方法、装置、设备及存储介质: 113821934A[P]. 2021-12-21.