



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117028167 B

(45) 授权公告日 2024. 05. 07

(21) 申请号 202311030022.8

(22) 申请日 2023.08.14

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117028167 A

(43) 申请公布日 2023.11.10

(73) 专利权人 武汉帕菲勒电气有限公司

地址 430000 湖北省武汉市武汉东湖开发区  
光谷大道303号光谷·芯中心一期1-01幢3层306号

(72) 发明人 潘昊 吴玟

(74) 专利代理机构 武汉智权专利代理事务所

(特殊普通合伙) 42225

专利代理师 陈桂扬

(51) Int. Cl.

F03D 17/00 (2016.01)

(56) 对比文件

CN 106640546 A, 2017.05.10

CN 107829884 A, 2018.03.23

CN 114017266 A, 2022.02.08

CN 115467786 A, 2022.12.13

US 2020018290 A1, 2020.01.16

审查员 王晓亮

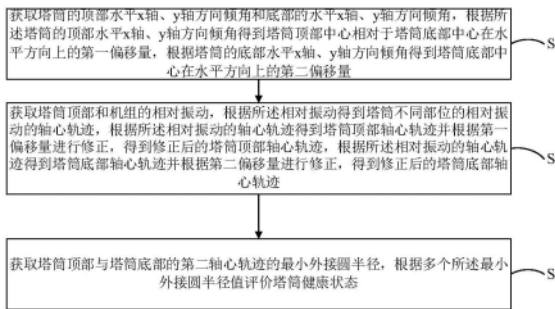
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种风机塔筒状态的健康评估方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种风机塔筒状态的健康评估方法及装置,涉及风力发电机监测技术领域,方法包括:获取塔筒的顶部与底部倾角,通过倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;获取塔筒顶部和机组的相对振动,根据相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据第一偏移量,第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。



1. 一种风机塔筒状态的健康评估方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

获取塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角和底部的水平x轴、y轴方向倾角,根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;

获取塔筒顶部和机组的相对振动,根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;

获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。

2. 如权利要求1所述的一种风机塔筒状态的健康评估方法,其特征在于,所述根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,包括:

根据公式:

$$\Delta r_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$$

$$\Delta x_1 = H \cdot \sin(\alpha_x)$$

$$\Delta y_1 = H \cdot \sin(\alpha_y)$$

得到水平方向第一偏移量  $\Delta r_1$ ,其中H为塔筒顶部到底部的距离,  $\Delta x$ 和  $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量,  $\alpha_x$ 和  $\alpha_y$ 为顶部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

3. 如权利要求2所述的一种风机塔筒状态的健康评估方法,其特征在于,所述根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量,包括:

根据公式:

$$\Delta r_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$

$$\Delta x_2 = H \cdot \sin(b_x)$$

$$\Delta y_2 = H \cdot \sin(b_y)$$

得到水平方向第二偏移量  $\Delta r_2$ ,其中H为塔筒顶部到底部的距离,  $\Delta x$ 和  $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量,  $b_x$ 和  $b_y$ 为塔筒底部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

4. 如权利要求3所述的一种风机塔筒状态的健康评估方法,其特征在于,所述根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹,包括:

根据公式:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_{x_i} \cos(\omega_{x_i} t + \varphi_{x_i})$$

$$f(y) = \sum_{i=0}^n a_{y_i} \cos(\omega_{y_i} t + \varphi_{y_i})$$

$$f(x, y) = (f(x), f(y))$$

得到塔筒顶部和塔筒底部的轴心轨迹 $f(x, y)$ , 其中,  $a$ 为幅值,  $\omega$ 是角速度,  $\varphi$ 为初始相位,  $f(x)$ 为 $x$ 向测量的时域波形方程,  $f(y)$ 为 $y$ 向测量的时域波形方程。

5. 如权利要求4所述的一种风机塔筒状态的健康评估方法, 其特征在于, 所述塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径, 根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态, 包括:

确定所述塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_1$ 与 $R_2$ ;

对不同历史时间段的 $R_1$ 与 $R_2$ 波形进行概率密度统计, 根据公式:

$$y = a * \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

进行拟合, 得到标准高斯函数拟合方程 $y$ ;

根据公式:

$$X_c = \bar{X} \pm 3\sigma$$

得到塔筒轴心健康样本模型 $X_c$ , 其中 $\bar{X}$ 为样本均值,  $\sigma$ 为样本方差;

根据公式:

$$H(t) = 1 - \frac{R_{rt} - \bar{X}}{3\sigma} \times 100\%$$

得到塔筒健康度 $H(t)$ ,  $R_{rt}$ 为顶部或底部轴心轨迹实时外接圆半径,  $X$ 为历史健康数据建立模型的均值,  $\sigma$ 为历史健康数据的方差。

6. 一种风机塔筒状态的健康评估装置, 其特征在于, 包括:

采集单元, 其用于获取塔筒的顶部水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角和底部的水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角;

计算单元, 其用于根据所述塔筒的顶部水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量, 根据塔筒的底部水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;

采集单元, 还用于获取塔筒顶部和机组的相对振动;

计算单元, 还用于根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹, 根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正, 得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹, 根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正, 得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;

评估单元, 其用于获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径, 根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。

7. 如权利要求6所述的一种风机塔筒状态的健康评估装置, 其特征在于, 所述计算单元用于:

根据公式:

$$\Delta r_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$$

$$\Delta x_1 = H \cdot \sin(\alpha_x)$$

$$\Delta y_1 = H \cdot \sin(\alpha_y)$$

得到水平方向第一偏移量  $\Delta r_1$ , 其中H为塔筒顶部到底部的距离,  $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量,  $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 为顶部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

8. 如权利要求6所述的一种风机塔筒状态的健康评估装置, 其特征在于, 所述计算单元还用于:

根据公式:

$$\Delta r_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$

$$\Delta x_2 = H \cdot \sin(b_x)$$

$$\Delta y_2 = H \cdot \sin(b_y)$$

得到水平方向第二偏移量  $\Delta r_2$ , 其中H为塔筒顶部到底部的距离,  $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量,  $b_x$ 和 $b_y$ 为塔筒底部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

9. 如权利要求6所述的一种风机塔筒状态的健康评估装置, 其特征在于, 所述计算单元还用于:

根据公式:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_{x_i} \cos(\omega_{x_i} t + \varphi_{x_i})$$

$$f(y) = \sum_{i=0}^n a_{y_i} \cos(\omega_{y_i} t + \varphi_{y_i})$$

$$f(x, y) = (f(x), f(y))$$

得到塔筒顶部和塔筒底部的第一轴心轨迹  $f(x, y)$ , 其中, a为幅值,  $\omega$ 是角速度,  $\varphi$ 为初始相位,  $f(x)$ 为x向测量的时域波形方程,  $f(y)$ 为y向测量的时域波形方程。

10. 如权利要求6所述的一种风机塔筒状态的健康评估装置, 其特征在于, 所述评估单元用于:

确定所述顶部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径  $R_1$  与底部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径  $R_2$ ;

对不同历史时间段的  $R_1$  与  $R_2$  波形进行概率密度统计, 根据公式:

$$y = a \cdot \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

进行拟合, 得到标准高斯函数拟合方程y;

根据公式:

$$X_c = \bar{X} \pm 3\sigma$$

得到塔筒轴心健康样本模型  $X_c$ , 其中  $\bar{X}$  为样本均值,  $\sigma$  为样本方差;

根据公式:

$$H(t) = 1 - \frac{R_{rt} - \bar{X}}{3\sigma} \times 100\%$$

得到塔筒健康度  $H(t)$ ,  $R_{rt}$  为顶部或底部轴心轨迹实时外接圆半径, X为历史健康数据建立模型的均值,  $\sigma$  为历史健康数据的方差。

## 一种风机塔筒状态的健康评估方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风机塔筒监测技术领域,具体涉及一种风机塔筒状态的健康评估方法及装置。

### 背景技术

[0002] 随着风电产业近年来的快速发展,风电事故多发,据不完全统计,风电机组的倒塌、失火已成为威胁风力发电机组安全运行的主要隐患。风电设备的长期维修和保养已经严重影响了风电项目的经济效益,因此,国内各个优秀的风电运营企业对风电设备安全、健康指标提出了更多更全面的技术要求,特别重视对风机关键部件的连续的在线监测,以便实时掌握风机安全稳定特性。

[0003] 风机长期运行后受到各种外力影响,造成塔筒偏离原来固定位置,即由于塔筒的基础沉降、变形等原因会引起向某一方向倾斜,当不能及时观测到风力发电厂风力机组塔筒倾斜度方向时,或当对风力发电场内某一风机塔筒所测的倾斜度数值出现较大偏差时,就会导致测量技术上的误判,继而无法保证风力发电机组塔筒的安全正常运行,甚至出现重大的安全生产隐患,乃至发生重大安全事故。

[0004] 风力机组塔筒倾斜度的监测工作并无小事可言,若沿用传统的倾斜度测量方法对其进行测量,所测出的倾斜度数值误差偏大,现有对测量风力发电机组塔筒倾斜度或其他圆形构筑物倾斜度的方法远远不能满足现时各行业的要求,是亟需解决的技术问题,尤其是对风力发电场风力机组塔筒倾斜度的测量工作,必须达到低误差和高测量效率的指标,方可实现对风力发电场内某一风力机组塔筒倾斜度的安全监测。

[0005] 目前,对风力发电机组塔架塔筒的监测工作尚属空白,对其他圆形构筑物倾斜度的测量方法则出现测量误差较大、测量步骤偏多的问题。

### 发明内容

[0006] 本申请提供一种风机塔筒状态的健康评估方法及装置,其可以减少测量步骤,提高测量准确性。

[0007] 第一方面,提供一种风机塔筒状态的健康评估方法,包括以下步骤:

[0008] 获取塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角和底部的水平x轴、y轴方向倾角,根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;

[0009] 获取塔筒顶部和机组的相对振动,根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;

[0010] 获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最

小外接圆半径值评价塔筒健康状态。

[0011] 一些实施例中,所述根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,包括:

[0012] 根据公式:

$$[0013] \quad \Delta r_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$$

$$[0014] \quad \Delta x_1 = H \cdot \sin(\alpha_x)$$

$$[0015] \quad \Delta y_1 = H \cdot \sin(\alpha_y)$$

[0016] 得到水平方向第一偏移量  $\Delta r_1$ ,其中H为塔筒顶部到底部的距离, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量, $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 为顶部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0017] 一些实施例中,所述根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量,包括:

[0018] 根据公式:

$$[0019] \quad \Delta r_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$

$$[0020] \quad \Delta x_2 = H \cdot \sin(b_x)$$

$$[0021] \quad \Delta y_2 = H \cdot \sin(b_y)$$

[0022] 得到水平方向第二偏移量  $\Delta r_2$ ,其中H为塔筒顶部到底部的距离, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量, $b_x$ 和 $b_y$ 为塔筒底部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0023] 一些实施例中,所述根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹,包括:

[0024] 根据公式:

$$[0025] \quad f(x) = \sum_{i=0}^n a_{x_i} \cos(\omega_{x_i} t + \varphi_{x_i})$$

$$[0026] \quad f(y) = \sum_{i=0}^n a_{y_i} \cos(\omega_{y_i} t + \varphi_{y_i})$$

$$[0027] \quad f(x, y) = (f(x), f(y))$$

[0028] 得到塔筒顶部和塔筒底部的轴心轨迹 $f(x, y)$ ,其中,a为幅值, $\omega$ 是角速度, $\varphi$ 为初始相位, $f(x)$ 为x向测量的时域波形方程, $f(y)$ 为y向测量的时域波形方程。

[0029] 一些实施例中,所述塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态,包括:

[0030] 确定所述塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_1$ 与 $R_2$ ;

[0031] 对不同历史时间段的 $R_1$ 与 $R_2$ 波形进行概率密度统计,根据公式:

$$[0032] \quad y = a \cdot \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

[0033] 进行拟合,得到标准高斯函数拟合方程y;

[0034] 根据公式:

$$[0035] \quad X_c = \bar{X} \pm 3\sigma$$

[0036] 得到塔筒轴心健康样本模型 $X_c$ ,其中 $\bar{X}$ 为样本均值, $\sigma$ 为样本方差;

[0037] 根据公式:

$$[0038] \quad H(t) = 1 - \frac{R_{rt} - \bar{X}}{3\sigma} \times 100\%$$

[0039] 得到塔筒健康度 $H(t)$ , $R_{rt}$ 为顶部或底部轴心轨迹实时外接圆半径, $X$ 为历史健康数据建立模型的均值, $\sigma$ 为历史健康数据的方差。

[0040] 第二方面,提供一种风机塔筒状态的健康评估装置,包括:

[0041] 采集单元,其用于获取塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角和底部的水平x轴、y轴方向倾角;

[0042] 计算单元,其用于根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;

[0043] 采集单元,还用于获取塔筒顶部和机组的相对振动;

[0044] 计算单元,还用于根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;

[0045] 评估单元,其用于获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。

[0046] 一些实施例中,所述计算单元用于:

[0047] 根据公式:

$$[0048] \quad \Delta r_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$$

$$[0049] \quad \Delta x_1 = H \cdot \sin(\alpha_x)$$

$$[0050] \quad \Delta y_1 = H \cdot \sin(\alpha_y)$$

[0051] 得到水平方向第一偏移量 $\Delta r_1$ ,其中 $H$ 为塔筒顶部到底部的距离, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量, $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 为顶部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0052] 一些实施例中,所述计算单元还用于:

[0053] 根据公式:

$$[0054] \quad \Delta r_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$

$$[0055] \quad \Delta x_2 = H \cdot \sin(b_x)$$

$$[0056] \quad \Delta y_2 = H \cdot \sin(b_y)$$

[0057] 得到水平方向第二偏移量 $\Delta r_2$ ,其中 $H$ 为塔筒顶部到底部的距离, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量, $b_x$ 和 $b_y$ 为塔筒底部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0058] 一些实施例中,所述计算单元还用于:

[0059] 根据公式:

$$[0060] \quad f(x) = \sum_{i=0}^n a_{x_i} \cos(\omega_{x_i} t + \varphi_{x_i})$$

$$[0061] \quad f(y) = \sum_{i=0}^n a_{y_i} \cos(\omega_{y_i} t + \varphi_{y_i})$$

$$[0062] \quad f(x, y) = (f(x), f(y))$$

[0063] 得到塔筒顶部和塔筒底部的心轨迹 $f(x, y)$ , 其中,  $a$ 为幅值,  $\omega$ 是角速度,  $\varphi$ 为初始相位,  $f(x)$ 为 $x$ 向测量的时域波形方程,  $f(y)$ 为 $y$ 向测量的时域波形方程。

[0064] 一些实施例中, 所述评价单元用于:

[0065] 确定所述顶部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_1$ 与底部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_2$ ;

[0066] 对不同历史时间段的 $R_1$ 与 $R_2$ 波形进行概率密度统计, 根据公式:

$$[0067] \quad y = a \cdot \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

[0068] 进行拟合, 得到标准高斯函数拟合方程 $y$ ;

[0069] 根据公式:

$$[0070] \quad X_c = \bar{X} \pm 3\sigma$$

[0071] 得到塔筒轴心健康样本模型 $X_c$ , 其中 $\bar{X}$ 为样本均值,  $\sigma$ 为样本方差;

[0072] 根据公式:

$$[0073] \quad H(t) = 1 - \frac{R_{rt} - \bar{X}}{3\sigma} \times 100\%$$

[0074] 得到塔筒健康度 $H(t)$ ,  $R_{rt}$ 为顶部或底部轴心轨迹实时外接圆半径,  $X$ 为历史健康数据建立模型的均值,  $\sigma$ 为历史健康数据的方差。

[0075] 本发明中, 通过获取塔筒的顶部水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角和底部的水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角, 根据所述塔筒的顶部水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量, 根据塔筒的底部水平 $x$ 轴、 $y$ 轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量; 获取塔筒顶部和机组的相对振动, 根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹, 根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正, 得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹, 根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正, 得到修正后的塔筒底部轴心轨迹; 获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径, 根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。本发明可以减少测量步骤, 提高测量准确性。

## 附图说明

[0076] 图1为本发明实施例中一种风机塔筒状态的健康评估方法的流程图;

[0077] 图2为本发明实施例中风电机塔筒结构示意图;

[0078] 图3为本发明实施例中塔筒顶部和塔筒底部的第一轴心轨迹示意图;

[0079] 图4为本发明实施例中塔筒顶部的第二轴心轨迹示意图;

[0080] 图5为本发明实施例中塔筒顶部振动数据概率密度统计图;

[0081] 图6为本发明实施例中一种风机塔筒状态的健康评估装置的示意图。

## 具体实施方式

[0082] 为使本申请实施例的目的、技术方案和优点更加清楚, 下面将结合本申请实施例



中的附图,对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本申请的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本申请保护。

[0083] 参见图1,图1为本发明实施例提供的一种风机塔筒状态的健康评估方法的流程示意图。如图1所示,该方法包括但不限于以下步骤:

[0084] S1. 获取塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角和底部的水平x轴、y轴方向倾角,根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;

[0085] S2. 获取塔筒顶部和机组的相对振动,根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;

[0086] S3. 获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。

[0087] 值得说明的是,本发明首先将风机塔筒模拟为机械轴,通过结合不同方向的振动信号与倾角信号,获得塔筒轴心的分布状况,再基于此评估风机机组的健康状态。

[0088] 参考图2,图2为风电机塔筒结构示意图,其中1为第一倾角传感器,2为风电机塔筒顶部,3为第二倾角传感器,4为风电机塔筒底部。

[0089] 一些实施例中,根据所述塔筒的顶部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,包括:

[0090] 根据公式:

$$[0091] \quad \Delta r_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$$

$$[0092] \quad \Delta x_1 = H \cdot \sin(\alpha_x)$$

$$[0093] \quad \Delta y_1 = H \cdot \sin(\alpha_y)$$

[0094] 得到水平方向第一偏移量  $\Delta r_1$ ,其中H为塔筒顶部到底部的距离, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量, $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 为顶部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0095] 一些实施例中,所述根据塔筒的底部水平x轴、y轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量,包括:

[0096] 根据公式:

$$[0097] \quad \Delta r_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$

$$[0098] \quad \Delta x_2 = H \cdot \sin(b_x)$$

$$[0099] \quad \Delta y_2 = H \cdot \sin(b_y)$$

[0100] 得到水平方向第二偏移量  $\Delta r_2$ ,其中H为塔筒顶部到底部的距离, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量, $b_x$ 和 $b_y$ 为塔筒底部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0101] 一些实施例中,所述根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根

据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹,包括:

[0102] 根据公式:

$$[0103] \quad f(x) = \sum_{i=0}^n a_{x_i} \cos(\omega_{x_i} t + \varphi_{x_i})$$

$$[0104] \quad f(y) = \sum_{i=0}^n a_{y_i} \cos(\omega_{y_i} t + \varphi_{y_i})$$

$$[0105] \quad f(x, y) = (f(x), f(y))$$

[0106] 得到塔筒顶部和塔筒底部的轴心轨迹 $f(x, y)$ ,其中, $a$ 为幅值, $\omega$ 是角速度, $\varphi$ 为初始相位, $f(x)$ 为 $x$ 向测量的时域波形方程, $f(y)$ 为 $y$ 向测量的时域波形方程。

[0107] 参见图3,图3为塔筒顶部和塔筒底部的第一轴心轨迹示意图,通过顶端和基座 $x$ 向、 $y$ 向加速度振动数据,以 $x$ 向加速度振动数据值作为曲线图的 $x$ 轴, $y$ 向加速度振动数据作为曲线图的 $y$ 轴,绘制 $x$ 向加速度振动- $y$ 向加速度振动相关曲线,即塔筒顶部与底部的相对振动的轴心轨迹。

[0108] 参见图4,图4为塔筒顶部的第二轴心轨迹示意图,根据所述偏移量对第一轴心轨迹进行移动得到第二轴心轨迹,包括:

[0109] 根据第一偏移量 $\Delta r_1$ 与第二偏移量 $\Delta r_2$ ,将所述第一轴心轨迹,平移得到第二轴心轨迹。

[0110] 一些实施例中,所述获取塔筒顶部与塔筒底部的第二轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态,包括:

[0111] 确定所述顶部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_1$ 与底部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_2$ ;

[0112] 值得说明的是,顶部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_1$ 可以代表塔筒顶部轴心振动的幅度,底部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_2$ 可以代表塔筒底部轴心振动的幅度。因此通过得出所述第二轴心轨迹的最小外接圆的半径与底部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径便可以反应风机塔组的轴心振动幅度,进而评价塔筒的健康程度。

[0113] 为了得到健康样本数据,我们分析不同历史时间段的塔筒顶部和底部轴心振动曲线最小外接圆的半径值 $R_1$ 和 $R_2$ 波形,进行概率密度统计,这里以一段时间的塔筒顶部振动数据的最小外接圆半径值的历史数据为例,可做出概率密度统计图5。

[0114] 对不同历史时间段的 $R_1$ 与 $R_2$ 波形进行概率密度统计,根据公式:

$$[0115] \quad y = a * \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

[0116] 进行拟合,得到标准高斯函数拟合方程 $y$ ;

[0117] 带入一段时间的塔筒顶部振动数据的最小外接圆半径值的历史数据,得到:

$$[0118] \quad y = 0.119 * \exp[-(x-82.11)^2/7.728]$$

[0119] 记拟合残差平方和为 $Q$ ,拟合偏差平方和为 $S$ ,构造统计量 $R^2 = 1 - \frac{Q}{S}$ ,可求得 $R^2$ 为0.996(接近于1),拟合程度较好。因此,可认为期间上轴心轨迹外接圆半径数据大致服从期望 $\mu$ 为82.11、方差 $\sigma$ 为3.864的正态分布。

[0120] 由于样本均值 $\bar{x}$ 和样本方差 $S^2$ 是总体期望 $\mu$ 和方差 $\sigma^2$ 的无偏估计,而 $\bar{x}$ 同时是总体期望的 $\mu$ 一致性估计量,即当样本足够大时, $\bar{x}$ 依概率逐渐收敛于 $\mu$ ,

[0121] 因此,我们得到其平均值和方差,并且建立塔筒轴心健康样本模型:

$$[0122] \quad X_c = \bar{X} \pm 3\sigma$$

[0123] 其中  $\bar{X}$  为样本均值,  $\sigma$  为样本方差;

[0124] 后续根据其统计分布的曲线,进行塔筒健康状态评估,根据公式:

$$[0125] \quad H(t) = 1 - \frac{R_{rt} - \bar{X}}{3\sigma} \times 100\%$$

[0126] 得到塔筒健康度  $H(t)$ ,  $R_{rt}$  为顶部或底部轴心轨迹实时外接圆半径,  $X$  为历史健康数据建立模型的均值,  $\sigma$  为历史健康数据的方差。

[0127] 本发明中的一种风机塔筒状态的健康评估方法,通过通过获取塔筒的顶部水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角和底部的水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角,根据所述塔筒的顶部水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据塔筒的底部水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;获取塔筒顶部和机组的相对振动,根据所述相对振动得到塔筒顶部与底部的相对振动的第一轴心轨迹,根据所述第一偏移量对塔筒顶部第一轴心轨迹进行平移得到塔筒顶部第二轴心轨迹,根据所述第二偏移量对塔筒底部第一轴心轨迹进行平移得到塔筒底部第二轴心轨迹;获取塔筒顶部与塔筒底部的第二轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。本发明可以减少测量步骤,提高测量准确性。

[0128] 参见图6本发明实施例还提供了一种风机塔筒状态的健康评估装置,包括:

[0129] 采集单元,其用于获取塔筒的顶部水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角和底部的水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角;

[0130] 计算单元,其用于根据所述塔筒的顶部水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角得到塔筒顶部中心相对于塔筒底部中心在水平方向上的第一偏移量,根据塔筒的底部水平  $x$  轴、 $y$  轴方向倾角得到塔筒底部中心在水平方向上的第二偏移量;

[0131] 采集单元,还用于获取塔筒顶部和机组的相对振动;

[0132] 计算单元,还用于根据所述相对振动得到塔筒不同部位的相对振动的轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒顶部轴心轨迹并根据第一偏移量进行修正,得到修正后的塔筒顶部轴心轨迹,根据所述相对振动的轴心轨迹得到塔筒底部轴心轨迹并根据第二偏移量进行修正,得到修正后的塔筒底部轴心轨迹;

[0133] 评估单元,其用于获取塔筒顶部与塔筒底部修正后的轴心轨迹的最小外接圆半径,根据多个所述最小外接圆半径值评价塔筒健康状态。

[0134] 一些实施例中,所述计算单元用于:

[0135] 根据公式:

$$[0136] \quad \Delta r_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$$

$$[0137] \quad \Delta x_1 = H \cdot \sin(\alpha_x)$$

$$[0138] \quad \Delta y_1 = H \cdot \sin(\alpha_y)$$

[0139] 得到水平方向第一偏移量  $\Delta r_1$ ,其中  $H$  为塔筒顶部到底部的距离,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为塔筒在  $x$  轴和  $y$  轴的偏移量,  $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  为顶部双轴倾角传感器和  $x$  轴、 $y$  轴的夹角。

[0140] 一些实施例中,所述计算单元还用于:

[0141] 根据公式:

$$[0142] \quad \Delta r_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$$

$$[0143] \quad \Delta x_2 = H \cdot \sin(b_x)$$

$$[0144] \quad \Delta y_2 = H \cdot \sin(b_y)$$

[0145] 得到水平方向第二偏移量  $\Delta r_2$ , 其中H为塔筒顶部到底部的距离,  $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为塔筒在x轴和y轴的偏移量,  $b_x$ 和 $b_y$ 为塔筒底部双轴倾角传感器和x轴、y轴的夹角。

[0146] 一些实施例中, 所述计算单元还用于:

[0147] 根据公式:

$$[0148] \quad f(x) = \sum_{i=0}^n a_{x_i} \cos(\omega_{x_i} t + \varphi_{x_i})$$

$$[0149] \quad f(y) = \sum_{i=0}^n a_{y_i} \cos(\omega_{y_i} t + \varphi_{y_i})$$

$$[0150] \quad f(x, y) = (f(x), f(y))$$

[0151] 得到塔筒顶部和塔筒底部的轴心轨迹 $f(x, y)$ , 其中,a为幅值,  $\omega$ 是角速度,  $\varphi$ 为初始相位,  $f(x)$ 为x向测量的时域波形方程,  $f(y)$ 为y向测量的时域波形方程。

[0152] 一些实施例中, 所述评价单元用于:

[0153] 确定所述顶部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_1$ 与底部第二轴心轨迹的最小外接圆的半径 $R_2$ ;

[0154] 对不同历史时间段的 $R_1$ 与 $R_2$ 波形进行概率密度统计, 根据公式:

$$[0155] \quad y = a \cdot \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

[0156] 进行拟合, 得到标准高斯函数拟合方程y;

[0157] 根据公式:

$$[0158] \quad X_c = \bar{X} \pm 3\sigma$$

[0159] 得到塔筒轴心健康样本模型 $X_c$ , 其中 $\bar{X}$ 为样本均值,  $\sigma$ 为样本方差;

[0160] 根据公式:

$$[0161] \quad H(t) = 1 - \frac{R_{tt} - \bar{X}}{3\sigma} \times 100\%$$

[0162] 得到塔筒健康度 $H(t)$ ,  $R_{tt}$ 为顶部或底部轴心轨迹实时外接圆半径,  $\bar{X}$ 为历史健康数据建立模型的均值,  $\sigma$ 为历史健康数据的方差。

[0163] 在本申请的描述中, 需要说明的是, 术语“上”、“下”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系, 仅是为了便于描述本申请和简化描述, 而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作, 因此不能理解为对本申请的限制。除非另有明确的规定和限定, 术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解, 例如, 可以是固定连接, 也可以是可拆卸连接, 或一体地连接; 可以是机械连接, 也可以是电连接; 可以是直接相连, 也可以通过中间媒介间接相连, 可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言, 可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

[0164] 需要说明的是, 在本申请中, 诸如“第一”和“第二”等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来, 而不一定要求或者暗示这些实体或操作

之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0165] 以上所述仅是本申请的具体实施方式,使本领域技术人员能够理解或实现本申请。对这些实施例的多种修改对本领域的技术人员来说将是显而易见的,本文中所定义的一般原理可以在不脱离本申请的精神或范围的情况下,在其它实施例中实现。因此,本申请将不会被限制于本文所示的这些实施例,而是要符合与本文所申请的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

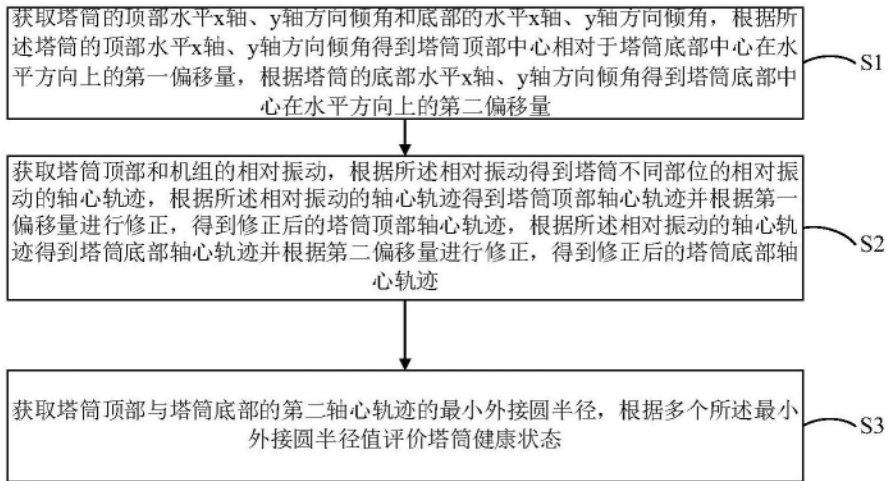


图1

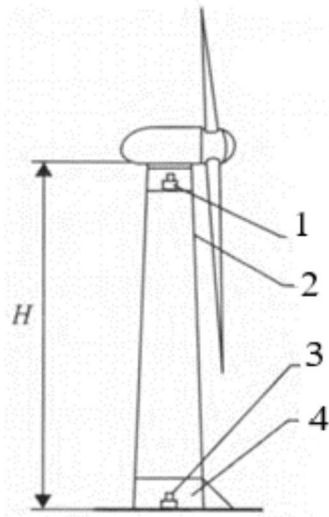


图2

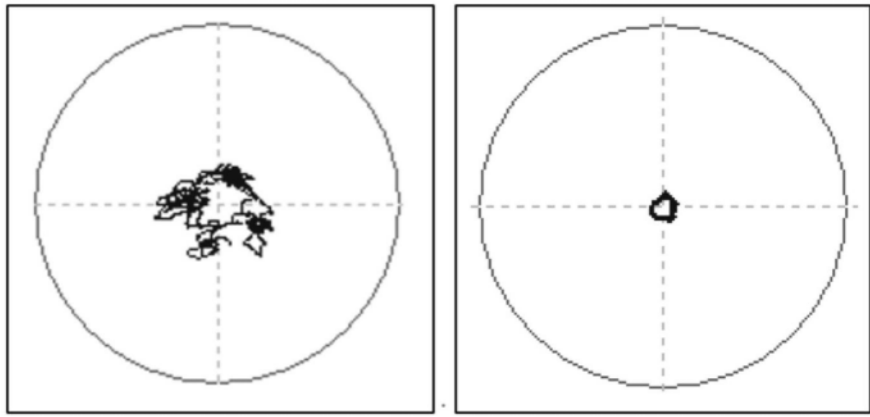


图3

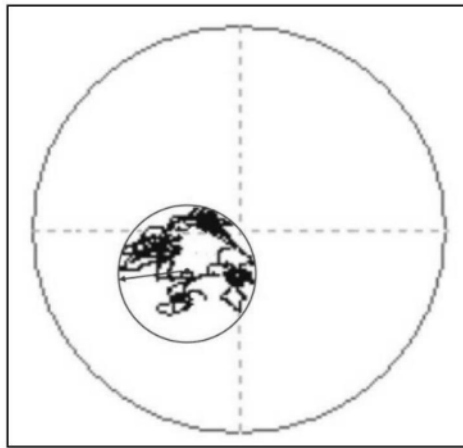


图4

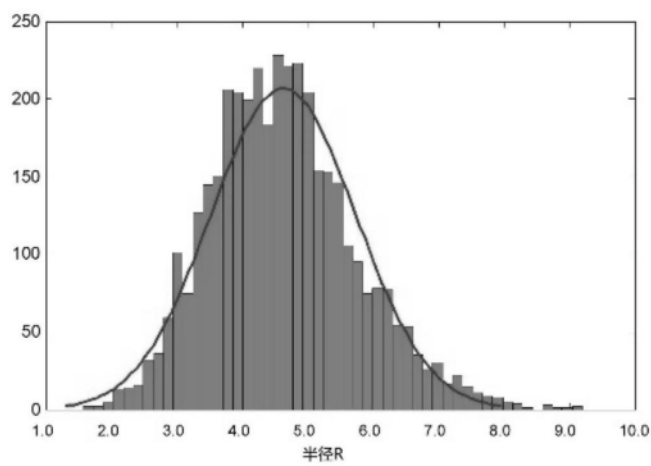


图5

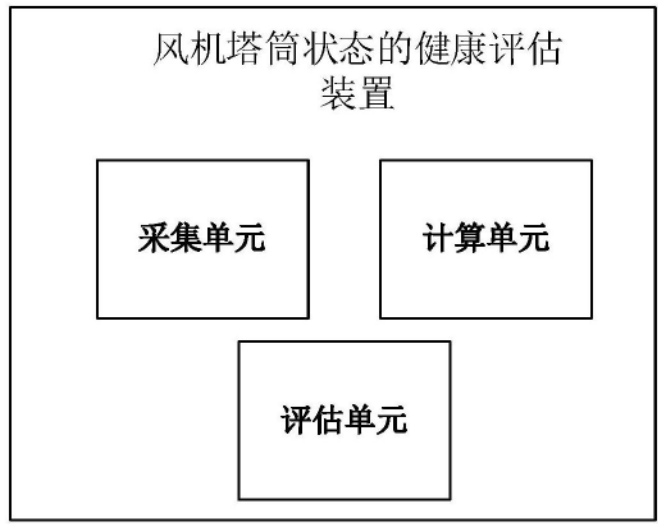


图6