

# 大型风电机组塔筒应力监测点的选取与预警

尹少平<sup>1</sup>, 冯沫<sup>1</sup>, 王灵梅<sup>1</sup>, 郭跃年<sup>2</sup>

(1. 山西大学 控制理论与控制工程学院, 太原 030013;

2. 国家电投集团 山西新能源有限公司, 太原 030001)

**摘要:** 针对大型风电机组塔筒应力监测缺失的情况, 提出基于 ANSYS 软件的塔筒应力点选取和 Pearson 相关系数法与灰色神经网络相结合的塔筒应力预警方法; 塔筒预警方法能够首先通过软件分析得出塔筒应力最大点, 避免应力传感器位置选取的不合理的问题; 而后根据风机所处的不同工况采用 Pearson 相关系数法与灰色神经网络相结合方法合理设置不同阈值, 避免单一阈值误报警的缺点; 通过 ansys 软件塔筒模态和受力分析结果与风电机组塔筒现场实验对比, 证明方法能够有效地选取塔筒应力最大点; 通过采用不同的预警方法对塔筒预警效果对比, 证明 Pearson 相关系数法与灰色神经网络能够准确依据塔筒运行状态设立合理阈值, 为风电机组塔筒的检测提供了科学依据。

**关键词:** 塔筒; 模态分析; 受力分析; Pearson 相关系数; 灰色神经网络; 应力预警

## Large Wind Turbine Stress Monitoring Point Selection and Early Warning

Yin Shaoping<sup>1</sup>, Feng Mo<sup>1</sup>, Wang Lingmei<sup>1</sup>, Guo Yuenian<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China;

2. China Power Investment Shanxi New Eenergy Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of stress monitoring of large wind turbine tower, a method of stress point selection based on ANSYS software and Pearson correlation coefficient method and gray neural network is proposed. The tower early warning method is that firstly the tower the maximum stress point is based on analysis to avoid the stress sensor position selection unreasonable problem; and then according to the different conditions of the fan using the Pearson correlation coefficient method combined with the gray neural network method to set different thresholds reasonably to avoid the shortcomings of a single threshold false alarm. The software analysis, field experiment and data verification show that the method can effectively monitor the tower stress and provide the basis for the detection of the tower of the wind turbine.

**Keywords:** tower; modal analysis; force analysis; Pearson correlation coefficient; gray neural network; stress warning

## 0 引言

随着低速风电机组不断发展, 塔筒加长已成为大势所趋。风电机组塔筒是重要的承载部件, 塔筒的性能直接影响了风力发电机运行的稳定性和可靠性, 风电机组塔筒监控也成为日益突出的问题, 塔筒应力监测已成为行业研究热点。张照煌<sup>[1]</sup>基于 ANSYS 有限元软件对风电机组塔架进行了受力分析和疲劳计算; 田章超<sup>[2]</sup>基于物联网的风电杆塔倾斜沉降监测预警系统; 周博<sup>[3]</sup>基于曹力 ANSYS 有限元软件对在役风电塔筒的静动态模拟与安全评估研究; 得出了风电机组塔筒模态和受力分析; 李婷婷<sup>[4]</sup>采取利用加权均值数据融合和置信区间数据校验的数据预处理方法对风电塔筒的倾斜、沉降现场多传感器数据进行初步整合, 提出了基于多传感器数据融合的风电塔筒倾斜沉降监测预警算法; 陈长征<sup>[5]</sup>按照 GL 规范基于 UG 软件对 1.5 MW 进行了塔筒和叶片受力分析; 郭鹏<sup>[6]</sup>

根据风电机组摇摆的力度, 设计了简单风电倾斜预警系统。但这些都进行风电机组塔筒位移和基地沉降的监测, 缺少对风电机组塔筒最重要的应力监测。而塔筒应力往往最能准确地反映塔筒的实际状况。但进行塔筒应力监测, 目前存在以下两个问题: 1) 风电机组塔筒往往高达 80 多米, 如何合理选取应力检测点成为实际中一大问题; 2) 风电机组工况复杂难以采用固定阈值方法进行故障预警<sup>[7-10]</sup>。

针对上诉问题 1), 本文首先采用 Pearson 软件进行塔筒模态和受力分析, 并与现场实验进行对比的方法得出塔筒应力最大点。针对问题 2), 本文通过建立塔筒异常状态识别模型解决这一问题, 其思想如下: 首先将风电机组及其部件的工作状态分为正常运行状态和异常状态; 其次利用正常运行状态下数据样本对运行参数进行建模, 所建模型称为参数的正常行为模型(简称参数模型); 然后用参数模型对状态参数进行预测, 获得参数预测值与实际值的残差, 当状态参数发生异常时, 参数模型的预测值将偏离实际值, 异常越严重, 出现偏离的情况越多; 最后通过对残差进行数据分析, 判定风电机组塔筒是否出现异常。本文塔筒应力预测参数模型本文采用能够快速收敛的灰色神经网络。而针对风电机组状态参数多, 全部作为预测模型的输入并将影响模型计算速度, 采用 pearson 相关系数法选取和塔筒应力相关较强的风电机组参数作为预测模型的输入, 提高模型的计算速度。

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-07-20。

基金项目: 2014 年度山西省煤基重点科技攻关项目(MD2014-06)。

作者简介: 尹少平(1965-), 男, 山西太原人, 硕士研究生导师, 主要从事计算机仿真、通讯安全方向的研究。

王灵梅(1964-), 女, 山西太原人, 博士生导师, 主要从事风电机组故障诊断、故障评估方向的研究。

## 1 塔筒模态分析和受力分析

### 1.1 塔筒模态计算与受力分析软件介绍

ANSYS 软件是目前应用最为广泛的一种软件。其应用范围已经涉及到结构力学、结构动力学、热力学、流体力学、电路学和电磁学等,并且可以实现各个领域内的耦合,在各个的工业领域有广泛的应用。该软件是由世界最大规模的有限元分析软件的生产商—美国开发研制的。而 ANSYS Workbench 是 ANSYS 公司出品的一代仿真平台。主要包括:结构静力学分析、结构动力学分析、刚体动力学分析、结构热分析、流体动力学分析等功能。本文主要采用 ANSYS Workbench 的结构动力学分析功能进行塔筒模态和应力分析。

### 1.2 仿真模型建立

本文以山西省某风电场风电机塔筒研究对象,其具体风电机塔筒数据如表 1 所示。

表 1 风电机塔筒数据

	上口/mm	下口/mm	长/mm	重量/kg	厚度/mm
塔筒 1	4200	4200	10130	26573	20~28
塔筒 2	3878	4200	16872	29892	16~18
塔筒 3	3463	3878	21691	29563	16~14
塔筒 4	2920	3463	28406	29508	12~14

### 1.3 塔筒模态分析

本文在 Proe 软件建立风电机塔筒模型;在将建立好的风电机塔筒模型导入 Ansys bench 软件;在 Ansys bench 软件编写塔筒模型材料的数据和划分单元格;最后在 Solution 中点击模态分析,最后得出塔筒模态分析结果。

### 1.4 塔筒受力分析

根据 GL 2010 认证规范,由 bladed 软件输出塔筒顶端载荷值,共 14 个极限工况和 70 个疲劳工况,每个工况包括 3 个方向的力和 3 个方向的力矩。本文选取 3 个方向的力和 3 个方向的矩各个方向上的最大值和最小值共 6 种工况进行分析,如图 1 所示。

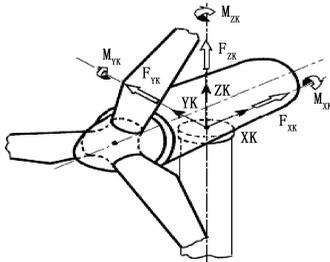


图 1 塔筒顶部受力分析图

## 2 数据前期处理

本文选取山西某风电场的机组机型为 1.5 MW 水平轴双馈型风电机组。该机组额定功率为 1.5 MW,切入风速为 3 m/s,额定风速为 15 m/s,切出风速为 25 m/s。本文首先按照 5 min 时间间隔采集 2016 年 3 月至 2017 年 3 月的塔筒应力监测数据。选择对应时间风电监测系统的监测参数为该风电机组状态参数,如表 2 所示。参照风机机组监测系统故障信息,排除风电机组故障时间内的塔筒应力数据和风电机组状态参数。将排除故障信息后的数据作为风电机组塔筒应力监测的

正常数据进行塔筒应力预测。

风电监测系统具有数据量大和表示的物理单位不同的特点,如果全部作为塔筒应力预测模型的输入,必将影响预测模型的运算速度。如果在海量的数据中找到塔筒应力相关性强的数据,作为灰色神经网络输入量必将提升塔筒应力预测效果。本文首先将风电机组状态参数进行归一化处理,消除不同单位量的影响;其次采用 Pearson 相关系数方法分析塔筒应力和风电机组状态参数各个参数的相关性,选取相关性最强的五因素作为塔筒应用预测模型的输入量,解决大量参数作为输入时,预测模型的复杂度和运算缓慢的问题。

表 2 部分风电监测系统数据

风速 1 /(m/s)	叶轮转速 1 /rpm	有功功率 /kW	风向 /(°)	无功功率 /kVar
5.1	12.75	178.5	188.05	7.0
7.4	13.11	202.98	184.31	7.0
8.5	12.97	196.86	175.73	8.0
5.1	12.68	179.51	182.82	11.0
5.3	12.68	181.56	183.21	10.0
5.6	12.66	182.58	184.18	10.0

### 2.1 数据归一化处理

针对不同单位的量风电监测系统数据,首先采用归一化处理,将数据限制在-1~1。为后面数据处理的方便,其次保证后续程序运行时收敛加快。

归一化公式:  $y = \frac{(y_{\max} - y_{\min}) * (x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} + y_{\min}$ , 其中

$y_{\max} = 1, y_{\min} = -1$ 。

### 2.2 相关性研究

本文采用 Pearson 相关性公式,得出和塔筒应力相关性较强的 5 的风电机组状态参数作为输入量。Pearson 相关系数法用来描述两组线性的数据一同变化移动的趋势。当两个变量的线性关系增强时,相关系数趋于 1 或 -1;当一个变量增大,另一个变量也增大时,表明它们之间是正相关的,相关系数大于 0;如果一个变量增大,另一个变量却减小,表明它们之间是负相关的,相关系数小于 0;如果相关系数等于 0,表明它们之间不存在线性相关关系。

Pearson 相关性公式:

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

## 3 灰色神经网络运行塔筒应力预测

灰色神经网络模型是在分析灰色系统与神经网络的特征的基础上,把 2 种技术有机融合,建立的计算模型,充分利用了两者在信息表现上存在的相似性及模型特点上存在的互补性,能弥补单纯使用灰色模型或单纯使用神经网络解决问题的不足。另外,利用神经网络对灰微分方程的参数进行白化,能弥补灰色系统在参数白化上的不足。

### 3.1 灰色神经网络模型原理

灰色神经网络模型首先对原始数据序列做一次累加,使累加后的数据呈现一定规律,然后用典型曲线拟合该曲线。设有时间数据序列  $x^{(0)}$ :

$$x^{(0)} = (x_i^{(0)} | t = 1, 2, \dots, n) = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$$

对  $x^{(0)}$  作一次累加得到新的数据序列  $x^{(1)}$ , 新的数据序列  $x^{(1)}$  第  $t$  项为原始数据序  $x^{(0)}$  列前  $t$  项之和, 即:

$$x^{(1)} = (x_t^{(1)} | t = 1, 2, \dots, n) = (x_1^{(0)}, \sum_{i=1}^1 x_i^{(0)}, \sum_{i=2}^2 x_i^{(0)}, \dots, \sum_{i=n}^n x_i^{(0)})$$

根据新的数据序列  $x^{(1)}$ , 建立白化方程, 即:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$$

该方程的解为:

$$x_t^{*(1)} = (x_1^{*(0)} - u/a)e^{-a(t-1)} + u/a$$

$x_t^{*(1)}$  为  $x_t^{(1)}$  序列的估计值, 对  $x_t^{*(1)}$  做一次累减得到  $x^{(0)}$  的预测值  $x_t^{(0)}$ , 即:

$$x_t^{*(0)} = x_t^{*(1)} - x_{t-1}^{*(1)}, t = 2, 3, \dots$$

### 3.2 灰色神经网络预测模型建立

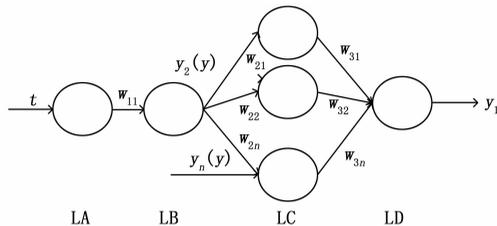


图 2 灰色神经网络拓扑结构

以本文为例, 基于灰色神经网络的塔筒应力预测算法流程如图 3 所示。步骤如下:

1) 考虑到塔筒应力预警在实际应用中需要快速得出预测值作为塔筒应力阈值, 故本案例选取输入风电机组状态参数为 5 维, 输出塔筒应力预测值为 1 维, 所以本文灰色神经网络结构为 1-1-6-1, 即 LA 层有 1 节点, LB 层有 1 个节点, LC 层有 6 个节点;

2) 选取塔筒应力 Pearson 相关性最强的 5 个风电机组状态参数作为预测模型的输入, 输出为塔筒应力预测值。

3) 从 1 年内的风电机组正常运行数据中随机选择 2 000 个数据。按 3: 1 的比例, 随机划分为 1 500 个训练数据和 500 个测试数据, 进行模型训练和验证。

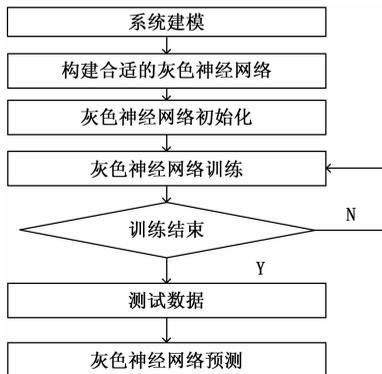


图 3 灰色神经网络流程图

## 4 基于灰色神经网络预测模型的塔筒应力预警方法

风电机组塔筒预警是当监测量超过一定数值, 进行数字预警方法。利用前期风电机组正常数据建立的灰色神经网络进行

塔筒应力预测模型的训练, 后期采用训练后的预测模型进行塔筒应力预测, 当塔筒监测值大于预测值 + 130% 训练误差, 风电机组塔筒监测系统故障报警; 当塔筒应力监测值小于等于预测值 + 130% 训练误差, 风电机组塔筒状态视为正常状态。

在以上理论的基础上, 提出基于灰色神经网络的塔筒应力预警方法, 如图 4 所示, 具体过程如下:

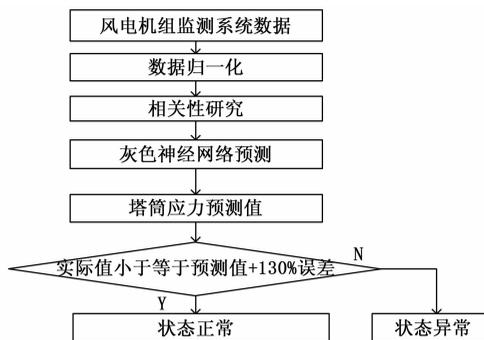


图 4 塔筒应力预警方法流程图

1) 选取风电机组前一个月内的运行正常状态数据, 作为灰色神经网络预测模型的训练数据。

2) 对以上风电监测系统数据进行数据归一化和相关性研究, 确定灰色神经网络预测模型的 5 个输入参数。

3) 将训练数据进行灰色神经网络预测模型的训练, 获取训练误差。

4) 将正常运行的风电机组数据进行塔筒应力预测, 并和时时监测数据进行比较。

5) 当监测数据大于预测值 + 130% 训练误差, 风电机组塔筒故障报警。

6) 当监测数据小于等于预测值 + 130% 训练误差, 风电机组塔筒状态正常。

## 5 验证与分析

### 5.1 塔筒应力监测点的选取

通过 ANSYS 软件按照 1.33、4 阶模态, 进行塔筒模态分析和受力分析。模态分析进行前 5 阶模态分析, 由于其 3、4 阶模态所处的状态为风电运行的风速内且 3、4 阶模态互相对应。所以按照其 3 阶模态进行分析, 分析结果如图 6, 从图 5 中可以清楚地看出在塔筒工作作风下的 3 阶塔筒模态时, 在 2 处变形最大; 同时由图 7 受力分析可知塔筒在受力情况下, 一般受力由 2 处逐渐向 1、3 处扩展。故在塔筒监测时应在塔筒 2 处设立应力监测点。

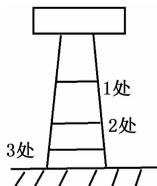


图 5 塔筒监测示意图

### 5.2 实验平台搭建及验证

实验选取山西省某风电场运行状态良好的风电机组, 按照图 5 所示部位在 1、2、3 处垂直方向和塔筒底部安装塔筒应变传感器, 并选取其中风电机组运行良好的 1 个月的数据进行数

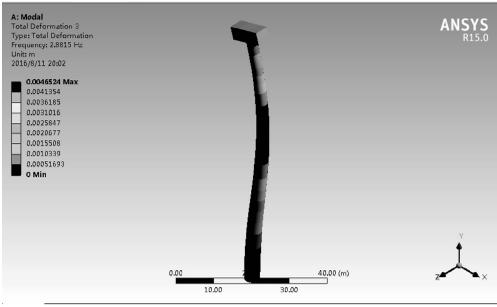


图 6 塔筒 3 阶模态分析结果

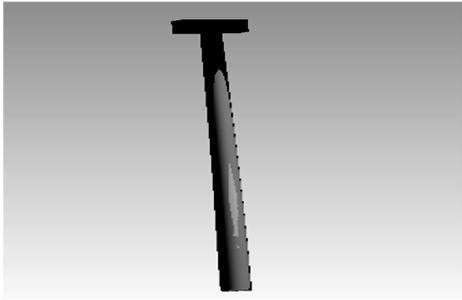


图 7 按照图 FX 最大计算结果

据分析。从图 8 可以明显的看出在相同风电机组工况下, 风电机组塔筒 2 处受力明显高于其他部位。

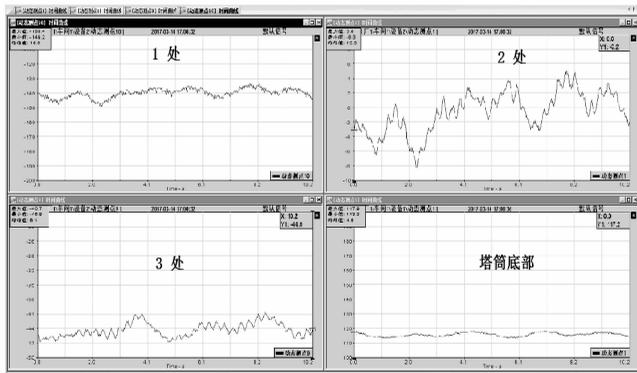


图 8 额定风速时 4 处迎风的监测点应变值比较

### 5.3 塔筒应力预警

#### 5.3.1 预警数据的选取

选取风电机组 1 年的正常运行数据中随机选择 2 000 个数据的状态数据作为预警模型的验证数据。按 3: 1 的比例, 随机划分为 1 500 个训练数据和 500 个测试数据, 进行实验验证。

#### 5.3.2 预警相关数据前处理

按照归一化 Pearson 相关性公式分析得出预测模型的输入量。由表 3 可知, 通过计算得到塔筒应力相关性较强的风机参数为: 振动  $x$  轴、电机轴承  $b$  温度、风速 2、齿轮箱冷却水温度、用功功率。将其作为灰色神经网络输入量。

#### 5.3.3 误差的计算

由图 9 可知塔筒应力预测误差, 随着训练次数的增加呈现逐渐减小的过程。本文选取后 100 组训练误差的平均值作为验证中采用的误差值。本文训练误差  $e=4$ 。

表 3 风电监测系统数据和塔筒应力相关性

风电监测系统数据	相关性系数
振动 $x$ 轴	0.6568
电机轴承 $b$ 温度	0.6455
风速 2	0.6038
风速 1	0.5386
齿轮箱冷却水温度	0.4751
用功功率	0.3991

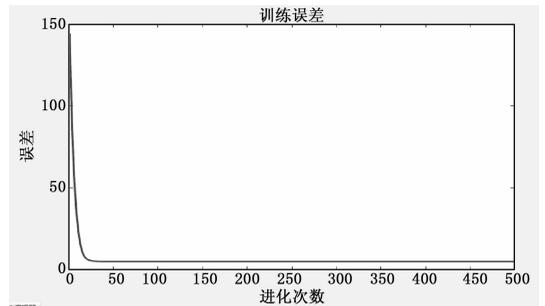


图 9 灰色神经网络训练误差

#### 5.3.4 基于灰色神经网络塔筒应力预警

采用灰色神经网络预测模型对 500 组数据塔筒应力数据进行预测。为使实验数据避免出现别的风电机组因素的影响, 500 组数据塔筒应力数据大多分布在运行状态的相似的 6 个小时段内。分析结果如图 10 所示, 从图中可以看出, 灰色神经网络阈值能够较为准确的反映塔筒真实运行状态, 且阈值与塔筒应力实际状态的差较为相近, 一旦塔筒出现严重变形其能及时对塔筒进行预警。固定阈值预警方法存在以下问题, 如果固定阈值设立过大往往不能起到阈值效果, 如果固定阈值偏小往往出现较大概率的误报警。

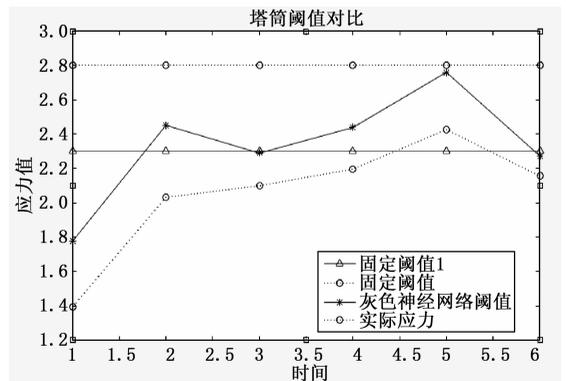


图 10 灰色网络预警值

表 4 不同塔筒阈值预警效果对比

	误报警数	阈值效果
灰色神经网络阈值	0	优
固定阈值 1	12	良
固定阈值 2	0	差

## 6 结论

1) 由塔筒应力现场监测实验得的结果可知 (图 10), 当风速在正常风速一下, 其塔筒应力最大点为图 5 所示的 2 处,

(下转第 43 页)