

# 风电机组叶片状态监测系统构建方法研究

傅质馨, 骆 阳, 袁 越

(河海大学能源与电气学院, 南京 211100)

**摘 要:** 针对某一型号的风电机组构建其叶片状态监测系统。使用CATIA软件建立叶片三维模型并生成风洞分析模型,采用集成于ANSYS/Workbench环境下的流体分析软件CFX对模型进行流场数值模拟并得出叶片在不同仿真参数下的应力云图。根据模拟结果,给出了应力传感器节点部署的详细步骤,通过数学规划方法,在已知可提供传感器最大数量的前提下,以传感器节点部署数量最少为优化目标得到节点部署方案。在此基础上选出传感器通信半径最小的方案,从而进一步节省监测系统的构建成本。所做工作能够为风电机组的运行与维护提供有益的参考。

**关键词:** 风力发电; 风电机组; 状态监测; 无线传感器网络; 数学规划

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## 0 引 言

叶片是风电机组的关键部件之一,因其整体裸露在外,工作环境恶劣,因而也是风电机组中最易发生故障的部件之一。叶片作为风电机组的动力源,在将风能转化为电能的过程中担任着重要角色,是受力最为复杂的部件<sup>[1]</sup>。当叶片发生失效事故尤其是发生断裂故障时,叶片的平衡旋转遭到破坏,若机组刹车装置延迟或失效,将对发电机组转轴等造成严重危害,影响风电机组正常工作与企业经济效益,因此对叶片状态监测的研究具有重要的实际意义。目前,针对叶片故障问题常采用的是人为定期巡检,或叶片到达使用年限后更换叶片。由于巡检耗时较长,无法及时记录故障情况,并且风场巡检人员手工记录数据后,需返回控制中心上传故障情况,之后还有审批、备件领料、送厂维修等系列流程,工作效率低,往往无法保证风电机组故障的及时修复与持续可靠运行。同时,目前风电机组的状态信息是通过有线传输方式获得的,而风电场地形复杂、面积广阔,有线部署的设施成本及部署难度远远大于无线传输方式<sup>[2]</sup>。如今,无线传感器

网络(wireless sensor network, WSN)技术的发展为风电机组叶片的状态监测提供了更加灵活的方案<sup>[3,4]</sup>,可将无线传感器节点部署在风电机组上,传感器节点负责采集并传递风电机组的状态信息<sup>[5]</sup>,从而对风电机组进行实时维护。节点部署作为构建风电机组状态监测系统中的重要一环,应保证获取信息的实时性与准确性。目前,有关将 WSN 技术应用到风电机组状态监测的研究较少,文献[6]指出 WSN 在风电机组状态监测方面应用的可行性,并说明节点的硬件设计方案和整个监测系统软硬件设计方案,但未给出具体的节点部署方案。文献[7]针对风电机组传动系统提出均匀部署、能量均衡部署和基于覆盖度的能量均衡部署方案,并对这3种方案进行理论分析和仿真比较,但是部署的节点数量较多,且未明确所需部署的传感器节点的类型。

基于上述分析,本文首先针对某一型号的风电机组叶片建立数值模拟模型进行流场仿真,以得出叶片在各仿真参数下的应力分布云图,结合应力分布云图,在已知可提供传感器最大数量的前提下,以传感器节点部署数量最少为优化目标得到节点

收稿日期: 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51307044); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(2014-XNY-008); 中央高校基本科研业务费(2016B08514)

通信作者: 骆 阳 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事风电机组状态监测技术方面的研究。yaluochn@163.com

部署方案,并挑选出传感器通信半径最小的方案作为最佳方案,从而节省叶片监测系统的构建成本。

## 1 风电机组叶片数值模拟模型建立

### 1.1 风电机组叶片几何模型建立

以型号为天奇 TG41.0G 的风电机组叶片为研究对象,根据生产厂家提供的叶片设计数据,在 CATIA 中分别建立叶片各个叶素曲线,使用多截面曲面命令将各个叶素曲线混合成曲面,然后再实体化得到风电机组叶片三维实体模型,如图 1。由于实际风电机组叶片结构复杂且使用的材料多样,此处为方便分析,认为整个叶片厚度均匀,为 15 mm,材料为 GFRP45(45 号玻璃钢)。

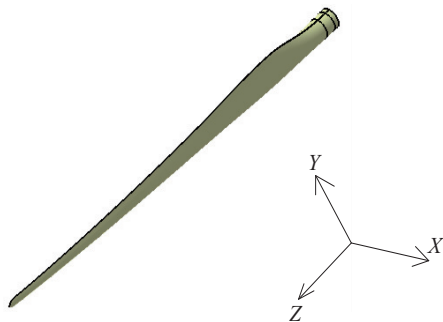


图1 风力机叶片三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of wind turbine blade

### 1.2 计算域创建及网格划分

#### 1.2.1 计算域创建

根据风洞尺寸设计经验,流场仿真计算时所设置的计算域达到一定大小时,风电机组叶片的流场就不受计算域尺寸的影响,该叶片长度为 40 m,这里将计算域大小设为叶片前部 40 m、后部 120 m、上部 40 m、下部 40 m<sup>[8,9]</sup>,如图 2 所示。

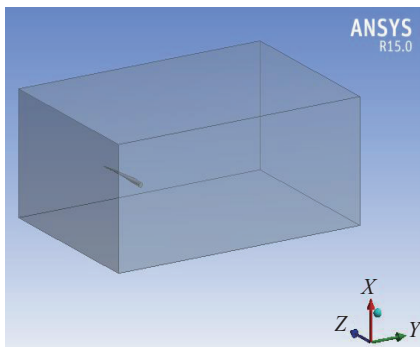


图2 计算域

Fig. 2 Computational domain

#### 1.2.2 网格划分

流场仿真之前,首先需要进行合理的网格划分,本文使用 ANSYS/workbench 进行网格划分,通过设置参数 Smoothing(平顺度)、Relevance Center(相关中心)、Span Angle Center(张角中心)、Curvature Normal Angle(曲率法向角度)、Min Size(最小尺寸)、Max Face Size(最大面尺寸)、Max Size(最大尺寸)、Growth Rate(增长率)即可获得较好的网格划分结果<sup>[10]</sup>,参数设置见表 1。网格划分结果如图 3 所示。网格划分质量可由 Element Quality(基于一个给定单元的体积与边长之比,该值处于 0 和 1 之间,值越大则网格质量越高)获得,这里 Min、Max、Average 值分别为 0.28、0.91、0.89,其中 Average(平均质量)一般不能低于 0.7 才能满足要求,此处网格划分结果较好,满足要求。

表1 网格划分参数设置

Table 1 Parameters setting of meshing

| 参数                     | 设定值  | 参数            | 设定值     |
|------------------------|------|---------------|---------|
| Smoothing              | High | Min Size      | 0.006 m |
| Relevance Center       | Fine | Max Face Size | 2.5 m   |
| Span Angle Center      | Fine | Max Size      | 3 m     |
| Curvature Normal Angle | 19°  | Growth Rate   | 1.2     |

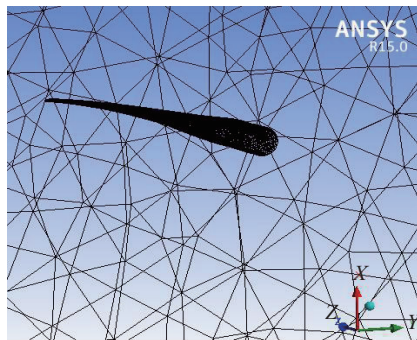


图3 网格划分结果

Fig. 3 Meshing result

## 2 叶片数值模拟

使用集成于 ANSYS/Workbench 环境下的 CFX 对叶片进行数值模拟<sup>[10]</sup>,得出叶片在工作中的应力分布情况,为传感器节点部署位置的确定提供依据。

### 2.1 设置边界条件

CFX 提供了 5 种边界条件:入口、出口、开口、

壁面与对称面。其中,入口边界条件包括速度、静压、湍流特效、质量流等。结合风电机组叶片的实际工作情况,边界条件作如下设置:

1)入口边界。风电机组偏航系统与控制系统配合,当风向由迎风状态变化时机舱绕着紧固在塔筒法兰上的大齿圈转动,使得风电机组风轮处于迎风状态,偏航系统的迟滞较小,此处不考虑,认为风轮一直处于迎风状态。入口处给定流体速度边界条件,将叶片攻角设为 $8^{\circ}$ ,该类型风电机组切出风速为 $25\text{ m/s}$ 。仿真过程中为了尽可能反映风电机组叶片在各种环境下的工作情况,设置多组仿真参数,将速度大小 $v$ 设置成 $10、15、20、25\text{ m/s}$ <sup>[11]</sup>。结合图1中坐标系分析,因风轮一直处于迎风状态,仿真时气流速度不考虑存在 $Z$ 轴方向分量的情况,在 $XY$ 平面上,速度方向与 $Y$ 轴夹角定义为 $\alpha$ ,设逆时针方向的角度为正,反之为负。将叶片分为上下2个部分,并分别进行仿真与部署,如图4所示。以上部分为例(下部分的部署同理),各大小值的速度的角度 $\alpha$ 均设有 $0^{\circ}、30^{\circ}、60^{\circ}$ (单独分析上部分叶片时, $\alpha\geq 0^{\circ}$ 时的叶片受力值大于 $\alpha<0^{\circ}$ 时的受力值,故只设置 $\alpha\geq 0^{\circ}$ 的情况),这里将速度写成分量形式: $(X,Y,Z)/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并对不同仿真参数下的仿真进行编号,见表2,共12种仿真参数。湍流采用基于RANS模拟的标准 $k-\varepsilon$ 模型,湍流强度设为4%,特征尺度为 $0.4\text{ m}$ 。

2)出口边界。出口处给定应力边界条件,设定出口静压为 $0\text{ Pa}$ ,湍流强度设为4%,特征尺度为 $0.4\text{ m}$ 。

3)壁面边界。各壁面设置为No Slip Wall(无滑移壁面)。

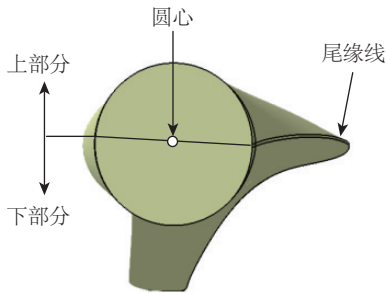


图4 叶片上下2个部分划分  
Fig.4 Division of two parts of upper and lower blade

| 表2 仿真参数                       |          |      |   |
|-------------------------------|----------|------|---|
| Table 2 Simulation parameters |          |      |   |
| 仿真编号                          | 速度分量 m/s |      |   |
|                               | X        | Y    | Z |
| I                             | 0        | 10   | 0 |
| II                            | 0        | 15   | 0 |
| III                           | 0        | 20   | 0 |
| IV                            | 0        | 25   | 0 |
| V                             | -5       | 8.7  | 0 |
| VI                            | -7.5     | 13   | 0 |
| VII                           | -10      | 17.3 | 0 |
| VIII                          | -12.5    | 21.7 | 0 |
| IX                            | -8.7     | 5    | 0 |
| X                             | -13      | 7.5  | 0 |
| XI                            | -17.3    | 10   | 0 |
| XII                           | -21.7    | 12.5 | 0 |

2.2 叶片应力分析

仿真后在后处理模块可得到叶片应力分布云图,此处以表2中编号为X的仿真进行说明,图5即为X情况下的仿真结果,图中左侧为应力值大小,该应力值是相对应力值,参考应力值为一个标准大气压( $101325\text{ Pa}$ ),实际应力值=相对应力值+大气压,例如该图中实际应力值范围为 $(-1812+101325, 629.1+101325)\text{ Pa}$ ,即 $(99513, 101954.1)\text{ Pa}$ 。找出应力值最大的点的位置,为后续传感器节点部署提供依据。

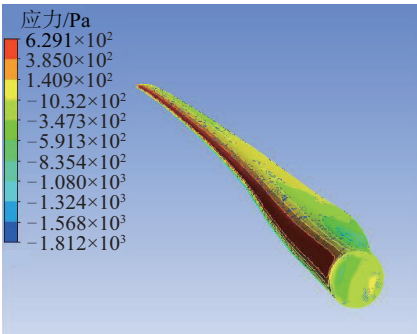


图5 编号为X的叶片应力云图  
Fig.5 No.X stress contours of blade

3 叶片状态监测系统节点部署策略

通过上述流体仿真过程可得到叶片的应力云

图,在图中能够找出应力值最大的点,为了便于后续研究和说明,本文给出如下定义:

1)准故障点:因在研究分析过程中认为叶片厚度均匀、材料不变,故将应力值最大的点视作最易发生故障的点,称为“准故障点”。

2)准故障区:叶片分区后准故障点所在的叶片区域称为“准故障区”。

本文部署的传感器为应力传感器,通过传感器获取的应力值与材料的许用应力值作比较,若大于许用应力值则判定发生故障。为了便于使所部署的应力传感器组成一个具有信息采集和传递功能的 WSN,即风电机组叶片状态监测系统,本文在进行节点部署时将按照如下步骤进行:

1)将叶片分区,通过设置多组流体仿真参数,得到相应的叶片应力云图;

2)找出各组仿真条件下的“准故障点”,并记录叶片各区域成为“准故障区”的次数,求出叶片各区域成为“准故障区”次数在总次数中的比例;

3)将所得比例值作为叶片各区的权重值,将权重值作为叶片各区部署传感器节点数量的重要依据;

4)结合权重值并在保证 WSN 信息传输连通性的前提下,通过数学规划方法求出各区域所需部署的传感器个数,使所需传感器总数最小;

5)进一步挑选出传感器通信半径的最小值,以满足应用需求的情况下节省监测系统构建成本。

下文将结合具体实例进行说明。

### 3.1 叶片分区

为便于说明传感器部署的方法,假设风电机组叶片沿展向为平面,叶片总长为 40 m,将叶片沿展向平分为 1、2、3、4 共 4 个区域,如图 6 所示。 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  分别为区 1、2、3、4 中所需部署的传感器数量。

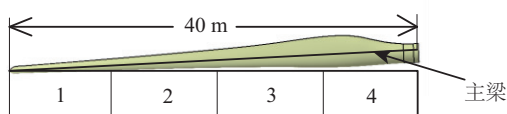


图6 叶片分区

Fig. 6 Regional division of blade

### 3.2 求解叶片各区域的权

此处叶片根部端面建在  $XY$  平面上,端面的圆

心位于坐标系原点(即  $Z$  坐标值为 0)处,故只需知道叶片上各点的  $Z$  坐标值即可判断出各点所在的区。通过上述应力分布云图,在后处理模块可得出各仿真参数下“准故障点”的  $Z$  坐标值,12 种仿真参数下的叶片“准故障点”的  $Z$  坐标值及“准故障点”所在区的编号见表 3。

表3 “准故障点”的  $Z$  坐标值及所在区

Table 3  $Z$  coordinate value and its region of quasi fault points

| 仿真编号 | $Z$ 坐标值/m | 区编号 |
|------|-----------|-----|
| I    | 6.7       | 1   |
| II   | 11.4      | 2   |
| III  | 14.2      | 2   |
| IV   | 17.3      | 2   |
| V    | 2.2       | 1   |
| VI   | 4.6       | 1   |
| VII  | 6.2       | 1   |
| VIII | 8.3       | 1   |
| IX   | 18.5      | 2   |
| X    | 27.3      | 3   |
| XI   | 25.8      | 3   |
| XII  | 36.4      | 4   |

由表 3 可得,叶片 4 个区域成为“准故障区”的次数分别为 5、4、2、1,故各区权重值  $\omega_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 分别为:  $\omega_1=0.42$ ,  $\omega_2=0.33$ ,  $\omega_3=0.17$ ,  $\omega_4=0.08$ 。

### 3.3 传感器节点部署策略

应力传感器节点的合理部署可降低叶片状态监测系统的能耗,节省成本,延长系统寿命。一般情况下传感器的通信半径可通过调节发射功率来改变,显然,在保证信息传输连通性的前提下,通信半径越小,传感器使用寿命越长。本文通过数学规划方法<sup>[12]</sup>,在已知可提供应力传感器最大数量的前提下,以传感器部署数量为优化目标,求出使得部署传感器数量最小的方案,并获得各区所需部署的传感器数量,在此基础上筛选出传感器通信半径最小的方案作为最佳方案。由于风电机组叶片的主要承载结构为叶片的主梁,在各区传感器数量求出后,分别将传感器沿叶片展向均匀部署在主梁上,如 1 区为 3 个传感器,则将传感器沿叶片展向均匀部署在该区。

非线性规划问题数学模型常表示为以下形式<sup>[13]</sup>:



$$\begin{cases} \min f(X) \\ h_i(X)=0, i=1,2,\dots,m \\ g_j(X)\geq 0, j=1,2,\dots,l \end{cases} \quad (2)$$

式中, 自变量  $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)^T$  ——  $n$  维欧氏空间  $E^n$  中的向量(点);  $f(X)$  —— 目标函数,  $h_i(X)=0$  和  $g_j(X)\geq 0$  是约束条件。下文结合具体算例说明传感器节点的部署方案。

若从状态监测系统构建的经济性角度考虑, 假设上部分叶片传感器数量最多能提供 10 个, 其通信半径大小  $R$  有 4、5、6、8、10、12 m 这几种可供选择。上述求得叶片各区权值:  $\omega_1=0.42$ ,  $\omega_2=0.33$ ,  $\omega_3=0.17$ ,  $\omega_4=0.08$ , 这里将叶片各区传感器部署数量的范围设置为:  $[10\cdot\omega_i]\leq x_i\leq[10\cdot\omega_i]+1$  ( $i=1,2,3,4$ ;  $[]$  表示取整), 其中,  $10\cdot\omega_i$  表示传感器最大数量 10 与各区权值  $\omega_i$  的乘积, 如区 1 中节点数量应满足  $3\leq x_1\leq 4$ ; 如图 7, 风力机有 3 个叶片, 每个叶片叶根处设有簇首节点(无传感器模块及信息监测功能, 但能量充足, 负责收集处理簇内所有节点传输的信息), 将从叶尖到叶根处的传感器节点分别编号为 1, 2,  $\dots$ ,  $n$ 。节点 1 将采集的风电机组状态信息传递给相邻节点 2, 节点 2 将信息传递给节点 3, 以此类推, 最后将状态信息传递给所在簇的簇首节点, 簇首节点再将信息进行处理并传输至信号接收节点。为保证传感器网络的连通性<sup>[4]</sup>, 部署节点时要保证相邻节点之间的距离小于节点通信半径的两倍。由于叶片各区内传感器是均匀部署, 则两相邻分区的距离最近的两节点间距离应小于  $2R$ , 此时同一个区内的两相邻节点距离必然小于  $2R$ , 如 1 区和 2 区中距离最近的两节点间距离  $10/x_1+10/x_2$  应小于等于  $2R$ , 此时 1 区内的两相邻节点间距离  $10/x_1$  必然小于  $2R$ 。令目标函数为  $f(x)$ , 综上, 可得非线性整数规划数学模型为:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} 3 \leq x_1 \leq 4 \\ 2 \leq x_2 \leq 3 \\ 2 \leq x_3 \leq 3 \\ 1 \leq x_4 \leq 2 \\ 8 \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 10 \\ 10/x_1 + 10/x_2 \leq 2R \\ 10/x_2 + 10/x_3 \leq 2R \\ 10/x_3 + 10/x_4 \leq 2R \\ x_1, x_2, x_3, x_4 \text{ 均为整数} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

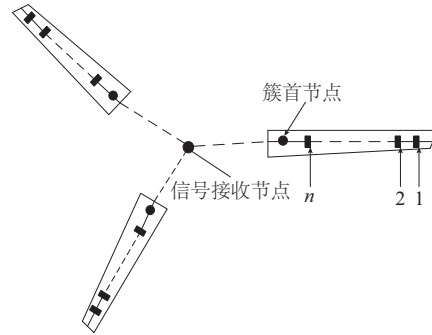


图7 监测系统网络拓扑结构图

Fig. 7 Network topology map of monitoring system

本文使用优化软件 GAMS 求解上述非线性整数规划问题, 分别求出节点通信半径  $R$  为 4、5、6、8、10、12 m 时的最优解, 见表 3。

表3 GAMS 优化结果

Table 3 Optimization results of GAMS

| 方案编号 | $R/\text{m}$ | $(x_1, x_2, x_3, x_4)$ | $f(X)$ |
|------|--------------|------------------------|--------|
| I    | 4            | 无最优解                   | 无最优解   |
| II   | 5            | (3, 2, 2, 2)           | 9      |
| III  | 6            | (3, 2, 2, 2)           | 9      |
| IV   | 8            | (3, 2, 2, 1)           | 8      |
| V    | 10           | (3, 2, 2, 1)           | 8      |
| VI   | 12           | (3, 2, 2, 1)           | 8      |

由表 3 可知, 当通信半径  $R$  为 4 m 时, 没有最优解, 这是因为当  $R$  较小时, 需要部署较多的传感器, 而传感器数量有限, 故无解; 当  $R$  为 5 和 6 m 时, 最优解为:  $(x_1, x_2, x_3, x_4)=(3, 2, 2, 2)$ ,  $f(X)=9$ ; 当  $R$  为 8、10、12 m 时, 最优解为  $(x_1, x_2, x_3, x_4)=(3, 2, 2, 1)$ ,  $f(X)=8$ , 可发现当  $R\geq 8$  m 时, 最优解相同, 这是因为当通信半径较大时, 传感器网络的连通性易得到保证, 无需部署太多传感器。由于通信半径越小, 传感器能耗越低, 故此处传感器部署方案的选择原则为: 在传感器部署数量最小的基础上选出传感器通信半径最小的方案作为最佳方案。因此, 选择编号为 IV 的部署方案作为最佳方案。

## 4 结 论

本文对风电机组叶片状态监测系统的构建方法展开研究, 提出一种传感器节点部署策略: 通过对风电机组叶片进行数值风洞模拟, 得到叶片应力分析结果。在所部署的传感器节点能够保证通信

即满足监测系统连通性的前提下,通过数学规划优化方法求得传感器节点的最优部署策略。研究表明,在已知可提供传感器最大数量的情况下,可得出满足使用要求的最佳部署方案,从而节省监测系统的构建成本。需要说明的是,本文的研究方法可根据实际应用情况灵活地改变参数设置,根据计算结果可方便地构建风电机组叶片状态监测系统,从而为风电机组的日常维护与运行提供有益的参考。

### [参考文献]

- [1] Lee Jung-Ryu, Kim Hyeong-Cheol. Feasibility of in situ blade deflection monitoring of a wind turbine using a laser displacement sensor within the tower[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2): 2—6.
- [2] Fu Zhixin, Yuan Yue. Condition health monitoring of offshore wind turbine based on wireless sensor network [A]. *The 10th International Power and Energy Conference [C]*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2012, 649—654.
- [3] 傅质馨,袁 越. 海上风电机组状态监控技术研究现状与展望[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(21): 121—129.
- [3] Fu Zhixin, Yuan Yue. Status and prospects on condition monitoring technologies of offshore wind turbine[J]. *Automation of Electric Power System*, 2012, 36(21): 121—129.
- [4] 黄 晓,程宏兵,杨 庚. 无线传感器网络覆盖连通性研究[J]. *通信学报*, 2009, 30(2): 130—134.
- [4] Huang Xiao, Cheng Hongbing, Yang Geng. Research of connectivity for wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(2): 130—134.
- [5] Luo Lihui, Zhang Yaonan, Zhu Weiping. E-science application of wireless sensor networks in eco-hydrological monitoring in the Heihe River basin, China [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2012, 6(6): 432—439.
- [6] Lin Li, Shen Mingxia. Design of a wind power generation monitoring system based on wireless sensor network [A]. *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application [C]*, Changsha, China, 2010.
- [7] 傅质馨,赵 敏,袁 越,等. 基于无线传感网络的海上风电机组状态监测系统构建方法[J]. *电力系统自动化*, 2012, 38(7): 23—27.
- [7] Fu Zhixin, Zhao Min, Yuan Yue, et al. Construction strategies for offshore wind turbine condition monitoring system based on wireless sensor networks[J]. *Automation of Electric Power System*, 2012, 38(7): 23—27.
- [8] Pandey R, Premalatha M. Design and analysis of flow velocity distribution inside a raceway pond using computational fluid dynamics[J]. *Bioprocess and Biosystems engineering*, 2017, 40(3): 439—450.
- [9] Peng Huayi, Lam Heungfai. Turbulence effects on the wake characteristics and aerodynamic performance of a straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel tests and large eddy simulations[J]. *Energy*, 2016, 109: 557—568.
- [10] Frías-Esquivel J, González-Alatorre G, Díaz-Ovalle C O, et al. Hydrodynamic analysis of the falling-film formation in evaporators using CFD simulation[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2017, 101: 57—65.
- [11] Lee Kyoungsoo, Roy Shrabanti, Huque Ziaul. Effect on torque and thrust of the pointed tip shape of a wind turbine blade[J]. *Energies*, 2017, 10(1): 3—16.
- [12] 俞礼军,梁明苹. 基于整数非线性规划的城市常规公交线网优化设计[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(2): 110—114.
- [12] Yu Lijun, Liang Mingping. Urban routine bus transit network optimizing design based on integer nonlinear programming model [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(2): 110—114.
- [13] 钱颂迪,甘应爱,田 丰,等. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社, 2012, 157—166.
- [13] Qian Songdi, Gan Yingai, Tian Feng, et al. Operations research [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012, 157—166.

## RESEARCH ON CONSTRUCTION METHOD OF CONDITION MONITORING SYSTEM OF WIND TURBINE BLADE

Fu Zhixin, Luo Yang, Yuan Yue

*(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)*

**Abstract:** Condition monitoring system of a certain type of wind turbine blade is constructed. The 3D modeling of blade is built by software CATIA, with which a wind tunnel model is generated for analysis. Flow numerical simulation based on the model is made by fluid analysis software CFX integrated in ANSYS/Workbench and stress contours of blade under different simulation parameters are obtained. According to the simulation results, detailed steps of stress sensor node deployment are given. Node deployment schemes are obtained with the minimum number of sensor nodes deployed as optimization objective under the premise of the maximum number of servable sensors. On this basis, the scheme of minimum communication radius of sensor is selected for further saving construction cost of monitoring system. The work provides a useful reference for the operation and maintenance of wind turbine.

**Keywords:** wind power; wind turbines; condition monitoring; wireless sensor networks; mathematical programming