

# 海、陆两用风力发电实验平台设计

戴巨川,袁贤松,赵前程,刘德顺

(湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**在风电场通过现场测试分析研究风力机性能由于受到现场环境的限制,能够获得的研究数据有限,室内模拟实验平台能够有效弥补研究不足.为此提出了一种海、陆两用风力发电实验平台方案.该实验平台由来风装置、风轮、发电机、两段式塔架、漂浮台、波浪产生装置、传感检测和数据采集系统等构成.在实验平台整体方案基础上,进行了结构参数设计,建立了漂浮台受力分析模型并获得了合理的结构参数,以 LabVIEW 为开发环境设计了上位机运行状态监控系统.最后,基于构建的实验平台,开展了部分风力机动态特性研究工作,对比分析了模拟陆地风力机和海上漂浮式风力机时塔架振动特性,为进一步深入开展风力机动态特性研究提供了基础.

**关键词:**风力发电;来风装置;漂浮台;LabVIEW;振动测试

**中图分类号:**TK83 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)02-0024-09

## Design of sea and land dual - use experiment platform for wind turbine

Dai Juchuan, Yuan Xiansong, Zhao Qiancheng, Liu Deshun

(School of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Due to the field environment constraints, it is very limited to obtain the research data form wind farm which is used to research the wind turbine performances. The indoor simulation experimental platform effectively compensate for the deficiency to a certain extent. Thus, an experiment platform scheme of wind turbines is proposed, which simulate the performances of not only land wind turbines but also offshore wind turbines. The experiment platform consisted of the wind supply device, wind turbine rotor, generator, tower, floating platform, wave simulation device, sensor detection and data acquisition system. The structural parameter design of experimental platform was carried out. By establishing the force analysis model of the floating platform, the reasonable structural parameters were obtained. The PC running state monitoring system based on LabVIEW software was designed, too. Using the experimental platform, some investigations on dynamic characteristics of wind turbines were conducted. The tower vibration characteristics of land wind turbines and offshore wind turbines were analyzed. The experiment platform provided the foundation for the further study of wind turbine dynamic characteristics.

**Keywords:** wind turbine; wind supply device; floating platform; LabVIEW software; vibration experiment

风能是一种可再生的清洁能源,是各国新能源开发和利用的战略选择,近年来对它的开发利用得到了迅速发展.当前风能利用的主要形式是通过风力机将风能转化为电能,风力机是涉及到空气动力学、机械动力学、电机学、信号处理与控制等多学科的复杂机电装备.尽管针对现代风力机已经开展了大量的理论

收稿日期:2014-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205123);湖南省自然科学基金资助项目(11JJ8002);湖南省科技计划资助项目(2012FJ4270)

通信作者:戴巨川(1979-),男,四川广安人,博士,副教授,主要从事风电技术与装备研究. E-mail: daijuchuan@163.com

研究工作,但运行过程中一些物理机理还没有完全理清,一些故障或事故产生的原因还无法得到合理解释,因此通过理论分析和实验相结合的手段提升现代大型风力机设计与运行控制水平一直是风电技术研究的主要途径.对风力机开展实验研究主要从现场测试和室内模拟实验2个方面展开.在现场测试方面,长期以来国内外学者展开了大量的工作,如Högström等在瑞典Näsudden风电场2 MW风力机上对尾流湍流强度进行了测试,发现尾流中心的湍流强度大约是风洞模拟实验中的2倍<sup>[1]</sup>;李仁年等在外场工况下,通过沿叶片展向选取多个段面布置带式压力传感器进行了风力机叶片表面压力测试,也发现实际结果与气动理论分析结果有一定差异<sup>[2]</sup>;KUSIAK等利用风场SCADA系统数据,从多个角度对风力机振动特性进行了研究<sup>[3-4]</sup>;Schroeder等在德国Wilhelmshaven风电场一台4.5 MW风力机上通过光纤光栅传感器完成了叶片应变分布测试<sup>[5]</sup>.虽然现场测试分析是研究风力机性能的有效方法,但由于现场环境的限制,能够获得的研究数据有限,特别是现代大型风力机逐步向着海上发展,现场测试研究更加困难,因而构建室内风力发电实验平台成为弥补现场测试研究不足的重要手段.在这方面,HAND等在美国NASA Ames研究中心的24.4 m×36.6 m大型风洞中构建了NREL Phase VI风力机(叶轮直径10 m,19.8 kW)实验平台,进行了非定常气动实验<sup>[6]</sup>;申振华等在低速风洞中对FFA-W3-221翼型“涡轮化”后的气动性能进行了实验测试<sup>[7]</sup>;ABDELKAFI等通过建立的室内风力机实验平台,对变速风力机连接到隔离负载的行为进行了研究<sup>[8]</sup>;任永峰等采用电动机模拟风力机风轮的方式构建了风力发电实验平台,能够实现风力机能量调控实验研究<sup>[9]</sup>;RODDIER等人建立了室内漂浮式风力机实验平台,包括水槽、漂浮台、简易风力机及测试系统等,为研究海上漂浮式风力机提供了基础,但该平台采用简化的风轮结构会带来较大的气动特性偏差<sup>[10]</sup>.可以看出,目前的实验平台以陆地风力机研究为主;功能单一,只能凸显某一方面性能.本文提出了一种海、陆两用的风力机实验平台方案,可以实现海上和陆地风力机动态特性的研究.

### 1 实验平台整体设计方案

现代大型风力机主要有异步电机双馈式、永磁同步电机直接驱动式以及半直驱式(中传动比齿轮箱)机组等几种类型.和双馈风力机相比,直驱式风力机取消了增速齿轮箱,在结构、可靠性、效率、维护量等方面得到改善,成为今后陆地和海上风力机的主流之一.因此,实验平台中采用直驱式风力机结构,系统构成方案如图1所示、结构示意图如图2.

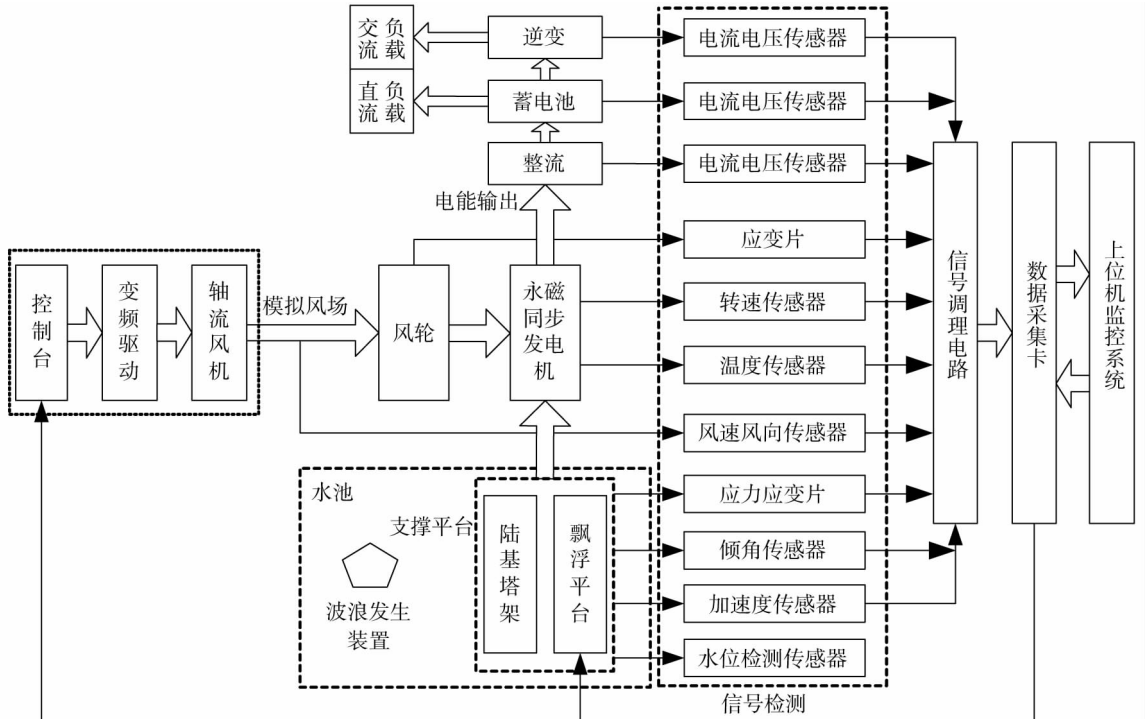


图1 实验平台系统方案

在本方案中,模拟风场利用多个轴流式通风机的变频控制实现,即通过变频器控制通风机转速来模拟风电场中风速的变化.现代大型直驱式风力机多采用三叶片风轮形式,为了与实际情况保持一致,本实验平台中风力机风轮亦采用3个叶片.来风装置出风推动风轮旋转,风轮旋转带动永磁同步发电机转动发电实现风能向电能的转换,整流后输送至蓄电池蓄能,然后逆变为220 V,50 Hz交流电可供普通电器使用.塔架是风力机的支撑部件,在本实验平台中,塔架由2段构成,当模拟陆地风力机时,2段塔架用法兰连接,固定在水池底部基座上(此时水池无水);当模拟海上漂浮式风力机时,仅采用塔架上段连接在漂浮台上,以保证风力机中心和来风装置中心同一高度,漂浮台漂浮在水池里用于支撑塔架,波浪产生装置固定在水池底部,用于模拟海上波浪产生.在来风装置的出风口布置风速传感器检测来流风速,在发电机输出端布置电流、电压传感器,检测发电机输出电压、电流等,在风轮叶片、塔架等部件上多点布置应变片检测应力应变,布置振动传感器检测振动,在漂浮台上布置倾角传感器、加速度传感器检测漂浮台运行过程中的动态特性.检测到的各种信号经过调理电路处理后送至数据采集卡,系统运行状态可以通过上位机监控软件进行监控.

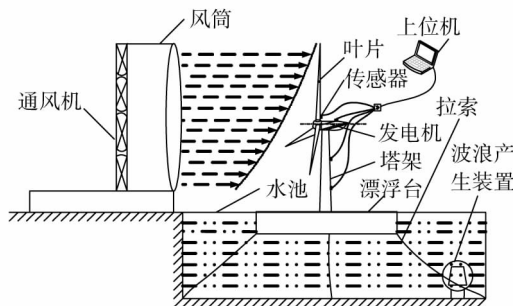


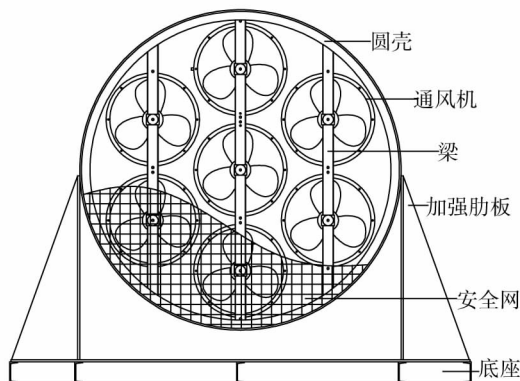
图2 实验平台结构示意图

## 2 实验平台结构及参数设计

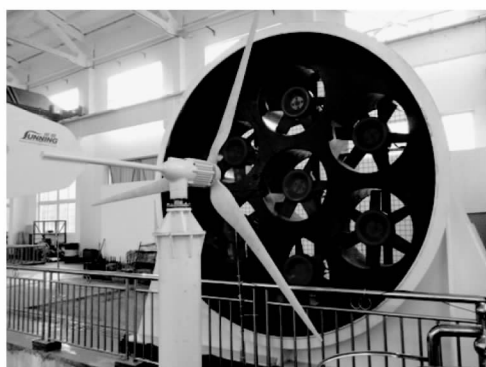
在设计实验平台时,需要考虑的主要部件包括来风装置,风轮及发电机、塔架、漂浮台、电能转换和存储等部分.为了简化设计,风轮及发电机选用已有商业化产品,额定功率为2 kW,相关参数如表1所示.

### 2.1 来风装置结构及参数设计

为了产生实验用风力机所需风源,设计来风装置结构如图3所示,主要由直径3 m外部圆壳、内部7个轴流式通风机(其中一个为中心其余周向等距分布)、安全网、下部底座等部分构成;7个独立变频器用于控制通风机转速.通风机具体参数由以下计算得出:



(a)来风装置结构示意图



(b)来风装置实物图

图3 来风装置结构示意图及实物图

单位时间内来风装置出风口风量为

$$Q = v \cdot A = v \cdot (D/2)^2 \pi. \quad (1)$$

表1 风轮及发电机技术参数

参数	数值
启动风速/(m/s)	2.5
额定风速/(m/s)	12
切入风速/(m/s)	3
额定功率/W	2 000
最大功率/W	2 500
风叶直径/m	3
风叶数量/个	3
发电极对数	5
安全风速/(m/s)	60
整机质量/kg	53

式中:  $D$  为风轮直径,  $m$ ;  $v$  为出风口风速,  $m/s$ ;  $A$  为出风口横截面积,  $m^2$ .

由于来风装置由 7 个轴流式通风机构成, 则每个通风机单位时间内的出风量应为

$$q = (v \cdot A) / 7 = v \cdot (D/2)^2 \cdot \pi / 7. \quad (2)$$

设计来风装置出风口风速不低于  $8 \text{ m/s}$ , 可得每个通风机的流量约为  $29\ 082 \text{ m}^3/\text{h}$ .

根据式(3)所示电机功率选取公式, 参考市场上商用通风机参数范围, 选择全压  $380 \text{ Pa}$  的轴流式通风机, 得单个通风机所需功率  $P \approx 5.5 \text{ kW}$ .

$$P = K \cdot q \cdot P_Q / 1\ 000 \cdot 3\ 600 / \eta. \quad (3)$$

式中:  $K$  为储备系数(取 1.3),  $\eta$  为通风机效率(取 0.75),  $P_Q$  为通风机全压.

## 2.2 飘浮台结构参数设计

漂浮式结构是海上风力机基础结构中的深水结构形式, 主要适用于  $50 \text{ m}$  以上水深海域. 由于近海浅水海域的风能资源有限, 今后的趋势必然是朝着深海漂浮式风力机发展. 风力机漂浮式平台由海洋油气平台发展而来却又不同于海洋油气平台, 其承受的推力会带来较大的倾覆力矩. 目前, 海上风力机漂浮式基础结构主要有单柱结构、张力腿结构和三浮体结构等(如图 4 所示). 单柱结构平衡依靠浮力罐底部的配重(压仓物)实现, 2009 年, 在挪威诞生的世界上第一座漂浮式风力发电机组 Hywind 就采用了这种结构. Hywind 容量  $2.3 \text{ MW}$ , 重  $138 \text{ t}$ ; 漂浮结构是一个约为  $117 \text{ m}$  长的细长钢质管, 其一端是底座, 另一端为风机法兰, 由 3 根钢缆固定在海床上. 由于其自由度高、位移量大需要较重的配重压仓物. 张力腿结构是一种垂直系泊的顺应式平台结构, 其平衡是依靠锚索在绷紧状态下产生的拉力与平台浮力实现. 该结构需要产生远大于结构自重的浮力, 多出的浮力不仅要克服自身重力, 还要抵消由于风、波所产生的倾覆力矩, 锚索长期处于绷紧状态. 三浮体结构利用大平面的重力扶正力矩使整个平台保持平衡, 结构较简单, 设计、制造、安装也较为容易, 经济性较好. 上述几种结构各有利弊, 使用时需要结合具体海洋环境确定, 本文设计的漂浮台采用三浮体结构.

漂浮台结构示意图如图 5 所示, 主要由 3 个空心封闭钢制压水舱、连接管、端盖、阻尼板、水泵等构成. 漂浮台上连接管呈等边三角形分布, 上部 3 根连接管与压水舱连通, 压水舱中各布置一台水泵, 以便在实验过程中可以调节各水舱中水量. 同时, 漂浮台设计安装倾角传感器, 这样当漂浮台失去平衡时, 可根据倾角传感器输出信号, 开启水泵调节 3 个水舱内的水量配重, 直至漂浮台重新平衡. 3 个水舱中间设有一个阻尼板, 用于减缓漂浮台的振动和倾斜. 为了模拟海浪对漂浮台的影响, 在水池中放置了波浪产生模拟装置.

根据实验室的实际情况, 确定来风装置中心线到水池侧边距为  $1.8 \text{ m}$ . 出于安全考虑, 飘浮平台到水池侧边至少保留  $0.1 \text{ m}$  距离; 塔架上段高为  $2.4 \text{ m}$ , 塔架外径  $0.150 \text{ m}$ , 内径  $0.144 \text{ m}$ ; 轮毂中心到水池底部距离  $6.7 \text{ m}$ (水池深  $5 \text{ m}$ ).

如图 5 所示, 轮毂中心到塔架下端高度用  $h_1$  表示( $2.6 \text{ m}$ ); 压水舱外径、内径和高度分别用  $R_1, r_1$  和  $h_y$  表示, 3 个压水舱及其上其它附属结构自重分别用  $G_{s1}, G_{s2}$  和  $G_{s3}$  表示; 连接管外径、内径和长度分别用  $R_2, r_2$  和  $l$  表示; 相邻 2 个压水舱中心距用  $L$  表示; 下端盖半径用  $R_3$  表示; 漂浮台平衡时吃水深度用  $h_c$  表示, 此时各压水舱内的配重水高分别用  $h_{p1}, h_{p2}$  和  $h_{p3}$  表示, 配重水自重分别用  $G_{w1}, G_{w2}$  和  $G_{w3}$  表示; 各压水舱受到的浮力分别用  $F_{f1}, F_{f2}$  和  $F_{f3}$  表示. 静置时设计吃水深度不大于压水舱高度的  $4/5$ . 由前面的条件可列出下面的约束关系

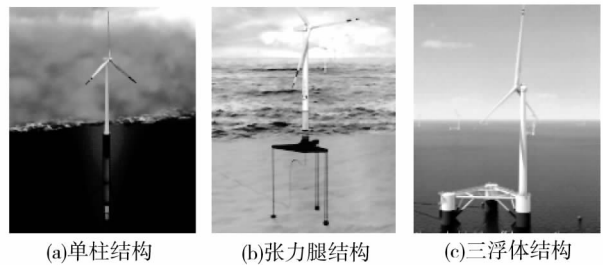


图 4 浮式结构示意图

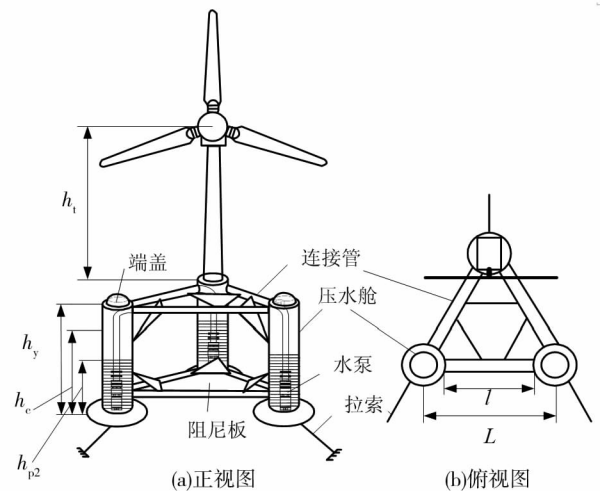


图 5 飘浮台结构示意图

$$\begin{cases} l + 4R_1 \leq 3.4; \\ \frac{h_c}{h_y} \leq \frac{4}{5}; \\ h_y \leq 2.5. \end{cases} \quad (4)$$

发电机、风轮和法兰总质量  $m_1 = 100 \text{ kg}$ ; 抽水泵单台质量  $m_2 = 20 \text{ kg}$ ; 塔架质量  $m_3 = 105 \text{ kg}$ . 漂浮台压水舱质量为  $m_4 = \rho_s \cdot \pi(R_1^2 - r_1^2) \cdot h_y$ , 安装风力发电机的压水舱上端盖质量  $m_5 = \pi\rho_s R_1^2 d_1$ , 另外2个压水舱上端盖质量  $m'_5 = \pi\rho_s R_1^2 d_2$ , 下端盖质量  $m_6 = \pi\rho_s R_3^2 d_3$ , 连接管质量  $m_7 = \rho_s \cdot \pi(R_2^2 - r_2^2) \cdot l$ ; 阻尼板质量  $m_8 = \rho_s A d_3 = \rho_s (\sqrt{3}L^2/4 - \pi R_1^2/2) d_4$ . 上述表达式中涉及到的  $d_1, d_2, d_3, d_4$  为板厚,  $\rho_s$  为钢材密度 ( $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ).

1) 飘浮平台静置状态下受力分析

静置状态是指风力机不受外力, 静止时的状态. 由图6可知静置时, 飘浮平台在重力与浮力相互作用下处于平衡状态, 此时各拉索处于自由状态, 1号压水舱、2号压水舱和3号压水舱上的拉索与池底的夹角  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  等分别在  $25^\circ, 20^\circ$  和  $20^\circ$  附近. 根据平衡条件, 可以得到如下关系

$$\begin{cases} G_{si} + G_{wi} = F_{fi}; & i = 1, 2, 3. \\ F_{f1} = F_{f2} = F_{f3}. \end{cases} \quad (5)$$

将前述结构参数代入式(5)可得

$$\begin{cases} F_{f1} = \pi\rho_w (R_1^2 h_c + R_2^2 l) g = G_{s1} + m_9 g; \\ G_{s2} = G_{s2} = G_{s1} - (m_1 + m_3 + m_5 - m'_5) g = (m_2 + m_4 + m'_5 + m_6 + 2m_7 + \frac{1}{3}m_8) g; \\ h_{p2} = h_{p3} = \frac{m_1 + m_3 + m_5 - m'_5}{\pi\rho_w r_1^2} + h_{p1}. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $m_9 = \pi\rho_w r_1^2 h_{p1}$  为安装风力发电机的压水舱(1号压水舱)内配重水质量,  $\rho_w$  为水的密度 ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ N/kg}$ .

2) 正向来风状态下飘浮平台受力分析

在正向来风状态下, 漂浮台受力如图7所示, 水平气动推力用  $F_1$  表示. 飘浮平台在重力、浮力、水平推力和拉索拉力共同作用下处于平衡状态. 设此时平台的整体吃水深度增量为  $\Delta h_{cz}$ , 单个压水舱浮力增量为  $\Delta F_z$ , 风力机所在的1号压水舱内配重水重力增量为  $\Delta G_{wz}$ 、配重水高度增加  $\Delta h_{pz}$ , 其余2个压水舱内配重水重力增量为  $-\Delta G_{wz}/2$ 、配重水高度增加  $-\Delta h_{pz}/2$ , 1号压水舱上拉索与池底的夹角  $\alpha = 25^\circ$ . 等效至面  $ABCD$  内, 根据力偶平衡条件可以得出如下关系

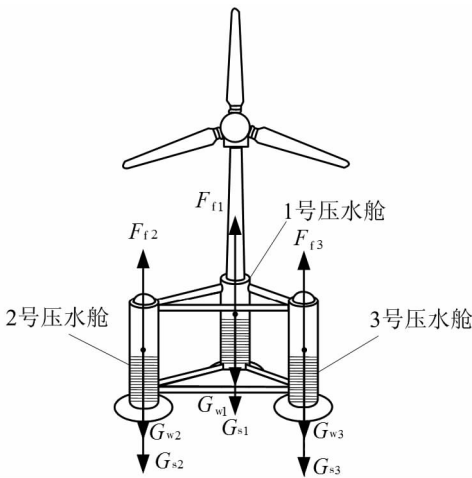


图6 静置时飘浮台受力

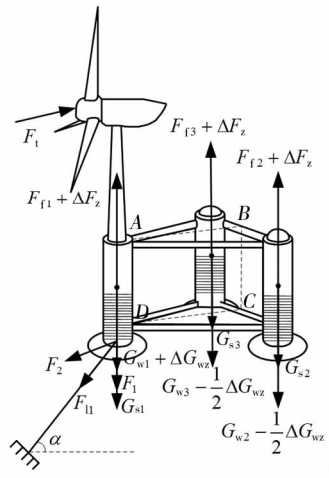


图7 正向来风状态下飘浮台受力

$$\begin{cases} F_1 = F_2; \\ F_1 = \tan\alpha F_2; \\ (G_{s1} + F_1 + G_{w1} + \Delta G_{wz} - F_{f1} - \Delta F_z) = (F_{f2} + \Delta F_z - G_{s2} - G_{w2} + \frac{1}{2}\Delta G_{wz} + F_{f3} + \Delta F_z - G_{s3} - G_{w3} + \frac{1}{2}\Delta G_{wz}); \\ F_1(h_t + h_y) = \frac{\sqrt{3}}{2}L(G_{s1} + F_1 + G_{w1} + \Delta G_{wz} - F_{f1} - \Delta F_z). \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} \Delta h_{cz} = \frac{F_1}{3\pi R_1^2 \rho_w g}; \\ \Delta G_{wz} = \pi r_1^2 \rho_w \Delta h_{pz} g. \end{cases}$$

并且应满足下面的约束关系

$$\begin{cases} h_c + \Delta h_{cz} \leq 0.9h_y; \\ h_{p2} - \frac{1}{2}\Delta h_{pz} \geq 0; \\ h_{p1} + \Delta h_{pz} \leq h_y. \end{cases} \quad (8)$$

### 3) 反向来风状态下飘浮平台受力分析

在反向来风状态下, 飘浮台受力如图 8 所示, 与图 7 相似, 飘浮平台同样在重力、浮力、水平推力和拉索拉力作用下处于平衡状态. 设此时平台的整体吃水深度增量为  $\Delta h_{cf}$ , 单个压水舱浮力的增量为  $\Delta F_f$ , 风力机所在的 1 号压水舱内配重水重力减小量为  $\Delta G_{wf}$ 、配重水高度减少  $\Delta h_{pf}$ , 2, 3 号压水舱上拉索所在平面与池底平面的夹角  $\beta = 20^\circ, \gamma = 20^\circ$ . 等效至面  $ABCD$  内, 根据力偶平衡条件可以得出如下关系

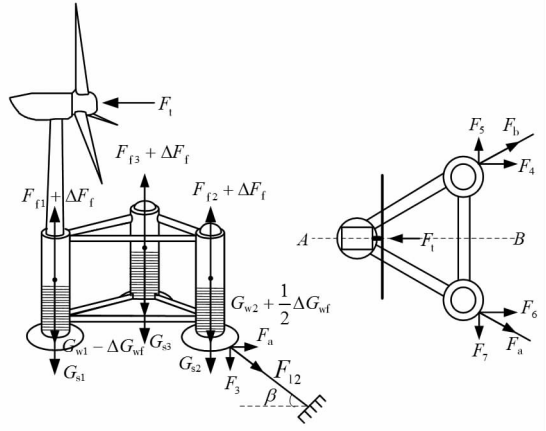


图 8 反向来风状态下飘浮平台受力

$$\begin{cases} F_1 = F_4 + F_6; \\ F_4 = F_6; \\ F_a = F_b = \frac{2\sqrt{3}}{3}F_4 = \frac{\sqrt{3}}{3}F_1; \\ F_3 = \tan\beta F_a \approx \tan\gamma F_a; \\ F_{11} + \Delta F_f - G_{s1} - G_{w1} + \Delta G_{wf} = G_{s2} + G_{w2} + \frac{1}{2}\Delta G_{wf} + F_3 - F_{12} - \Delta F_f + G_{s3} + G_{w3} + \frac{1}{2}\Delta G_{wf} + F_3 - F_{13} - \Delta F_f; \\ F_1(h_1 + h_y) = \frac{\sqrt{3}}{2}L(F_{11} + \Delta F_f - G_{s1} - G_{w1} + \Delta G_{wf}). \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} \Delta h_{cf} = \frac{2F_3}{3\pi R_1^2 \rho_w g}; \\ \Delta G_{wf} = \pi r_1^2 \rho_w \Delta h_{pf} g. \end{cases}$$

并且应满足下面的约束关系:

$$\begin{cases} h_c + \Delta h_{cf} \leq 0.9h_y; \\ h_{p2} + \frac{1}{2}\Delta h_{pf} \leq h_y; \\ h_{p1} - \Delta h_{pf} \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

采用普通结构钢 Q235 作为制造飘浮平台的材料, 考虑到在运输、安装及实验过程中可能出现意外碰撞, 制造压水舱、连接管、阻尼板、下端盖等的钢板厚度根据经验取 4 mm; 安装风力机的 1 号压水舱上端盖由于要固定塔架, 钢板厚度取 15 mm, 2, 3 号压水舱上端盖厚度均取 10 mm. 在水平气动推力  $F_1$  最大为 500 N 时, 根据式(4) ~ 式(10), 可求得满足条件的结构参数. 计算结果表明, 满足条件的结构参数有多组, 结合实际情况选取其中一组参数进行飘浮台制造(参数如表 2 所示, 实物图如图 9 所示). 在

表 2 飘浮平台具体参数

名称	长度	外径	内径	厚度
连接杆	1.200	0.040	0.036	0.004
压水舱筒体	2.000	0.500	0.496	0.004
1 号压水舱上端盖	-	0.500	-	0.015
2,3 号压水舱上端盖	-	0.500	-	0.010
压水舱下端盖	-	0.600	-	0.004
阻尼板	1.200	-	-	0.004

该组结构参数下,漂浮台在不同工况下的吃水深度、各压水舱内配重水深度如表3所示。

表3 漂浮平台各状态配比参数 m

状态	吃水深度		压水舱配重水深	
	$h_e$	$h_{p1}$	$h_{p2}$	$h_{p3}$
静置	1.500	0.835	1.134	1.134
正向推力	1.546	0.903	1.100	1.100
反向推力	1.569	0.655	1.224	1.224

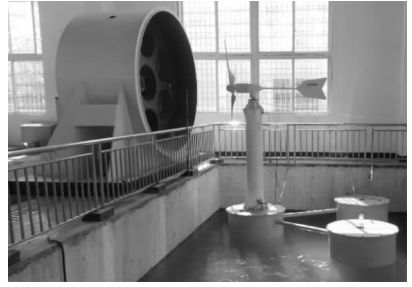


图9 漂浮台实物

### 3 运行状态监控系统设计

为了获得实验系统在运行过程中动态特性,需要实时检测系统运行状态参数,如风速、转速、电流电压、应力应变、振动加速度等.如图10所示,监控系统由底层硬件平台和上层软件平台2部分组成.风速、风向传感器、振动传感器、电流电压传感器等测得的信号经过信号调理电路后传送至数据采集卡,最后这些信息在计算机中进行分析处理.为了处理信息的方便,利用LabVIEW软件开发上位机监控软件;数据采集卡选用配套的USB-6351多功能数据采集卡,该采集卡是美国NI公司推出的基于USB总线的X系列高速数据采集和控制设备,提供了高达16位分辨率的16路模拟输入通道,可实现8路16位差分输入,输入电压范围为 $\pm 10$ V,24条数字I/O线,2路模拟输出,4路32位计数器,具有高达1MS/s的采样率.

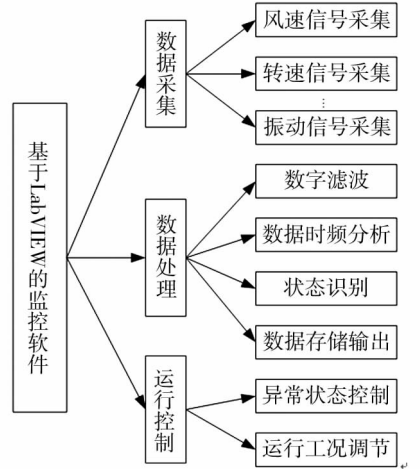


图10 监控系统软件功能

上位机监控软件基于LabVIEW开发,它具有编程方便,人机交互界面直观友好,强大的数据可视化分析等特点.图10为运行监控软件功能示意图,由数据采集、数据处理、运行控制三大功能模块构成.数据采集模块主要完成采集参数设置(采样频率和采样点数的设置等),电流电压、风速、应力应变、振动等运行状态参数的实时采集.考虑到在采集过程中出现的采样误差及其他电磁干扰,一些采集到的数据还需要进行数字滤波处理,这是数据处理首先需要完成的工作.然后,针对不同的状态参数特征,选用适当的时域或频域分析方法进行处理,并进而完成运行状态识别,对特殊数据还要进行长期存储或者输出.如果出现异常状态,则发出停机信号.图11所示为监控系统软件流程图,图12为监控系统软件界面.

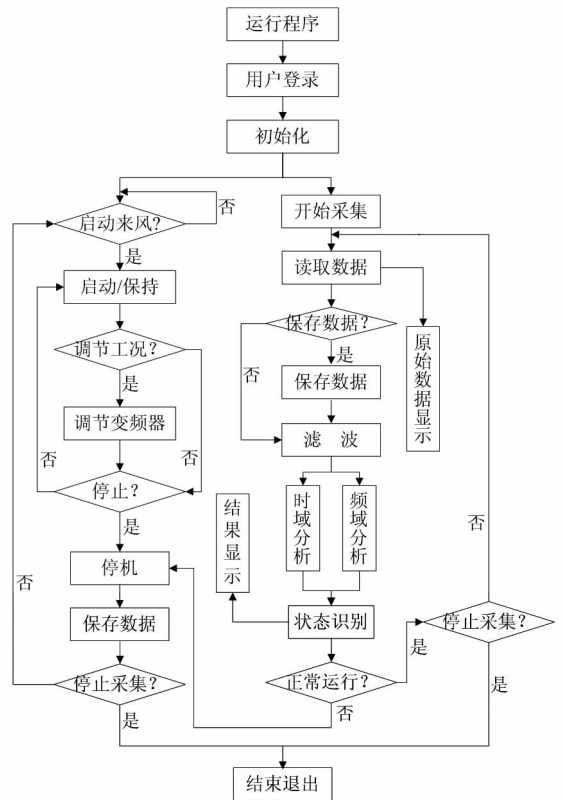


图11 监控系统软件流程图

### 4 塔架振动测试与分析

#### 4.1 振动传感器选型及其布点

风力机塔架振动影响风力机运行可靠性和服役寿命,也是分析和认识风电机组动力行为的基础.为了有效获取塔架振动特性,振动传感器选型及其布点策略必须恰当.随着现代传感技术的发展,能够用于振动测量的传感器已有多种,如涡流位移传感器、电容传感器、磁

电速度计、压电加速度计等. 由于压电式加速度传感器具有结构简单、耐高温、输出线性好、测量的动态范围大、安装简单等特点,因而常用于获取振动信号. 但是,压电式传感器能够输出的信号是很微弱的电荷,加之传感器本身的内阻也很大,因此输出信号一般先送入高阻抗的前置放大器,现有商业传感器一般都已进行集成. 压电加速度传感器的输出电荷(电压)与作用力成正比,其性能特性一般可用二阶系统描述,如下

$$H(\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + j2\xi\omega_n\omega + \omega_n^2} \quad (11)$$

式中:  $\omega_n$  为传感器固有频率,Hz;  $\xi$  为阻尼比;  $\omega$  为被测信号频率,Hz.

幅频特性  $A(\omega)$  和相频特性  $\varphi(\omega)$  为

$$\begin{cases} A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \\ \varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

本实验台中选用的加速度传感器灵敏度为 1 000 mV/g,量程 5 g,分辨率为  $2 \times 10^{-5}$  g,测试频率范围为 0.1 ~ 2 000 Hz.

为了确定合理的传感器布点位置,首先利用有限元分析软件 ANSYS 分析塔架(包含上、下 2 段)模态频率及其振型,分析时将风轮及发电机用集中质量点代替,位于塔架顶端. 图 13 所示为塔架前五阶模态振型,模态频率分别为 2.956 Hz,2.956 Hz,22.074 Hz,22.078 Hz 和 46.927 Hz.

从图 13 可以看出,在塔架顶部和中部可能出现较大位置偏移,因此考虑在这 2 个高度位置分别布置振动传感器. 由于风力机在运行过程中,不但在前后方向承受载荷,在侧向同样也可能承受载荷,而载荷变化正是致塔架振动的原因;因而,为了更好地获取塔架振动状态,在同一高度前后方向、侧向分别布置振动传感器. 综上,实验台采用 4 个振动传感器对塔架振动状态进行监测,传感器的布点位置如图 14 所示(模拟海上漂浮式风力机时,B-B 截面位于漂浮台上端与塔架连接处);图中 1,3 测点位于前后方向,2,4 测点位于侧向.

### 4.2 塔架振动测试及数据分析

图 15 和图 16 分别给出了模拟陆地风力机和海上漂浮式风力机时测得塔架振动波形及其频谱分析图(相同风速下). 图 15(a)和图 15(b)分别为模拟陆地风力机时在塔架顶部、中部测得的前后方向和侧向振动加速度时域波形及其频谱图;可以看出,前后方向振动加速度(测点 1 和测点 3)要大于侧向振动加速度(测点 2 和测点 4),这是因为前后方向是塔架主要的承载方向;前后方向振动信号的频谱成分集中在 25 Hz 附近,侧向振动信号频谱幅值小,没有明显最大峰值,分散在较宽频带内. 在不同高度测得的塔架振动加速度值差异较大,这与塔架各阶模态频率、振型及风轮运行频率有关. 图 16(a)和图 16(b)分别为模拟海上漂浮式风力机时在塔架顶部、漂浮台上端测得的前后方向和侧向振动加速度. 模拟海上漂浮式风力机时,仅采用塔架上半段与漂浮台联结构成支撑结构,图 16 中显示的各测点振动加速度与图 15 中明显不同. 由于流固耦合的影响,海上漂浮式风力机支撑结构在前后方向、侧向运动相互影响,同一高度不同方向上的振动加速度差异不大;从幅频谱可以看出,前后方向最大振幅出现在较低频率处(<25 Hz),侧向在多个频率处出现了较大振幅. 这与陆地风力机振动特性明显不同,也说明

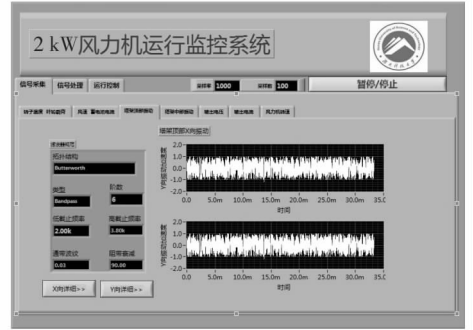


图 12 监控系统软件界面

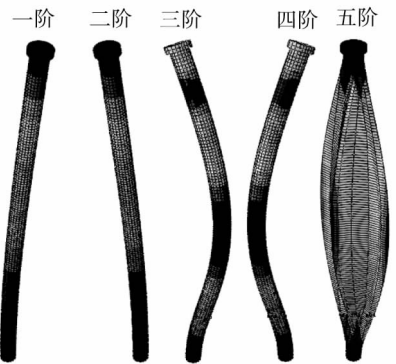


图 13 风力机塔架振型

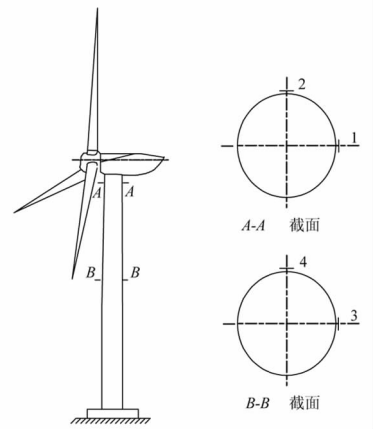


图 14 加速度传感器测点布置示意图



海上风力机在控制策略上与陆地风力机有较大差异,有必要借助相关理论和实验进一步开展深入研究.

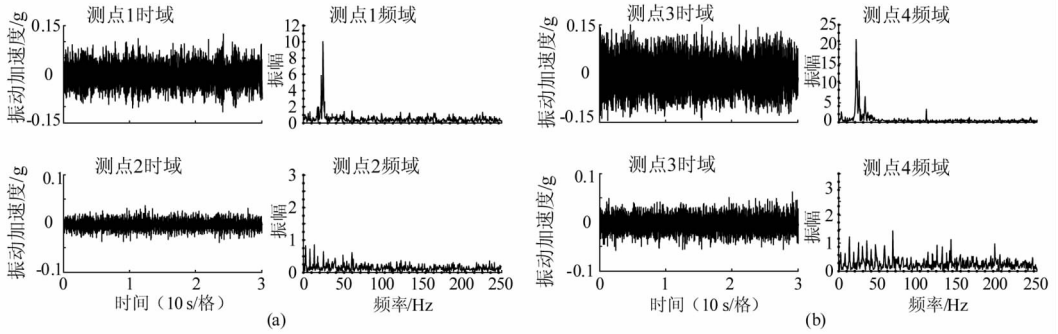


图 15 陆基塔架振动波形及其频谱

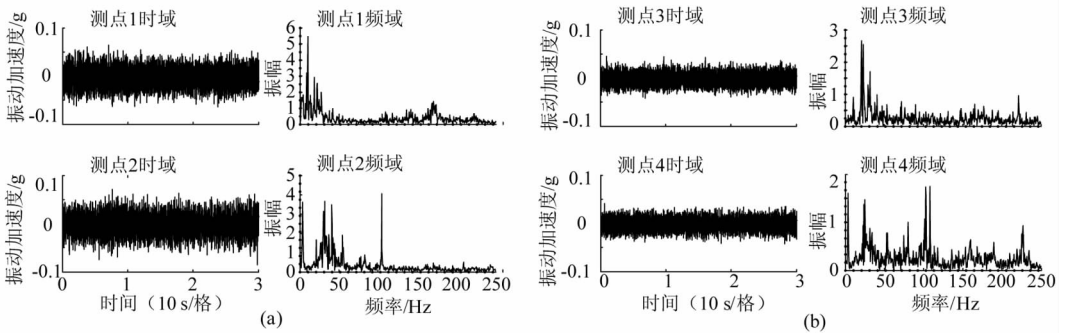


图 16 漂浮式风力机塔架振动波形及其频谱

## 5 结论

1) 提出了一种海、陆两用风力发电实验平台方案,该实验平台由来风装置、风轮、发电机、塔架、漂浮台、波浪产生装置、传感检测和数据采集系统等构成,能够满足海、陆风力机的动态特性实验要求.

2) 完成了来风装置、漂浮台结构参数设计,构建了静置、正向来风和反向来风等状态下漂浮台受力分析模型,得到了合理的结构参数.

3) 开发了基于 LabVIEW 的上位机监控软件,涵盖数据采集、数据处理、运行控制等多个功能模块,能够有效获取、分析和处理实验平台运行状态参数.

4) 基于该实验平台获得的塔架振动测试结果表明,陆地风力机塔架振动与海上漂浮式风力机有明显不同,这也意味着海上风力机在控制策略上必然与陆地风力机存在较大差异,需要借助相关理论及实验进一步开展深入研究.

## 参考文献:

- [1] Högström U H, Asimakopoulos D, Kambezidis H, et al. A field study of the wake behind a 2 mw wind turbine [J]. Atmospheric Environment (1967), 1988, 22(4): 803-820.
- [2] 李仁年,袁尚科,魏列江,等. 风力机叶片表面压力的计算与外场测试分析[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 52-56.
- [3] Kusiak A, Zhang Z. Analysis of wind turbine vibrations based on scada data[J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2010, 132(3): 031008.
- [4] Zhang Z, Kusiak A. Monitoring wind turbine vibration based on scada data[J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2012, 134(2): 021004.
- [5] Schroeder K, Ecke W, Apitz J, et al. A fibre bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(5): 1167-1172.
- [6] Hand M M, Simms D, Fingersh L, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase v: Test configuration and available data campaigns[M]. National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [7] 申振华,于国亮,申鸿焯,等. 增大叶片弯度提高风力机性能的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 830-833.
- [8] Abdelkafi A, Masmoudi A, Krichen L. Experimental investigation on the performance of an autonomous wind energy conversion system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1): 581-590.
- [9] 任永峰,李含善,王涛,等. 离网型风力发电测试及实验系统一体化研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(10): 1158-1162.
- [10] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. Windfloat: A floating foundation for offshore wind turbines [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010, 2: 033104.