

# 海上风电基础结构安全监测系统开发与应用研究

杨三元, 杨安韬, 郭伟

(中交第三航务工程局有限公司 上海 200032)

**摘要:**海上风电基础结构的安全是风电场安全运营的重中之重,因此需要对海上风电基础结构的受力状态、振动状态、腐蚀情况进行实时、准确的监测,文章基于以上需求,开发一套基于物联网技术和云平台技术的海上风电基础结构安全监测系统,可满足海上风电基础结构安全自动监测的要求,集数据实时监测与传输、远程测控、数据分析与预警等功能于一体,可远程读取风机基础结构在各种工况下的结构安全数据,并进行结构安全评估、分析,为全面分析风机基础结构的寿命及安全性提供了数据支撑。

**关键词:**海上风机;数据采集;振动监测;腐蚀监测;在线监测

## 0 引言

海上风机基础区别于一般建筑结构基础,兼有大型动力设备基础、高耸建筑结构基础、海洋工程结构基础的特性。风机基础在使用期需要承受风、波浪、水流等环境要素产生的荷载作用,还可能承受船舶撞击荷载<sup>[1]</sup>。海上风机基础结构的安全是风电场安全运营的重中之重,因此对海上风机基础结构的安全监测变得非常重要,常规的海工结构安全监测通过人工现场采集传感器数据的方式进行检测,根据现场监测结果确定被保护结构所处状态。但是由于海上风电场通常远离海岸线,直线距离通常在数十海里以上,航道距离则更长,日常的维护检测相当困难,采用通常的人工监测的方式根本不可能在第一时间发现问题,尤其是台风、大潮汛期间等天气恶劣的情况下,对海上风机基础结构的受力、振动状况尤为关注,但是恶劣的情况下反而不具备出海监测的条件。所以常规人工监测的方法因为效率低下、受环境因素影响较大等原因,完全不能满足海上风机结构安全监测的要求。随着远程通信技术、传感器技术的发展,一种新型的远程自动化监测方案成为可能。本文提出了一种可用于海上风机基础结构安全监测的远程自动化监测

方案,开发了相应的软、硬件系统,对风机基础结构的受力状况、振动状况、腐蚀保护状态进行实时监测。解决了人工监测效率低、数据完整性和实时性差等问题,系统集振动监测、结构安全监测、阴极保护电位监测于一体,建立专用的信息管理平台,对所有安全监测数据进行统一存储、管理、维护与分析,通过信息化手段提高监测水平,为设计人员和管理者科学决策提供依据。系统可在无人值守的情况下实时、准确地获得风机上的监测数据。这对于风电基础结构的安全有着重要的意义,克服了传统的人工监测手段的诸多弊端,能更客观地反映实际的风电基础的状况。对保障海上风电基础结构的安全性、降低企业后期维护成本,起到了重要的作用。

## 1 系统设计

### 1.1 总体框架

海上风电基础结构安全监测系统基于物联网技术和云平台技术进行开发,提出了一种在无人值守条件下监测数据获取的思路,其设计思路是:在风机上安装自动检测装置(称为现场测控单元),获取埋设在风机基础结构中的传感器数据,包括钢筋计、钢板计、混凝土应变计、加速度计、倾角计等传

传感器,并通过远程通信的方式将数据传输至中央控制室进行分析处理,系统服务器主要用于接收现场监测数据,根据监测数据判断是否响应超限报警,并发送监控指令等,通常安装在陆上升压站集控中心<sup>[2]</sup>。系统借助数据处理和发布平台,将监测结果发布到因特网上,各级授权用户可以通过网络访问海上风电基础结构安全监测系统平台,可以远程向现场监测单元发生远程测控指令,既能远程设置现场测控单元的监控参数,也可以远程监控现场测控单元的工作状态,实现远程自动化采集,海上风电基础结构安全监测系统整体框架见图1。

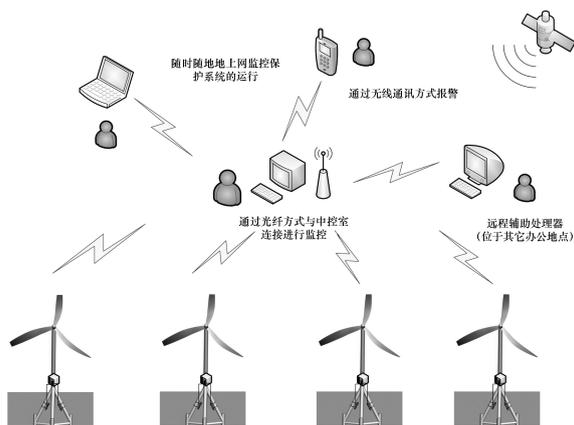


图1 系统整体框架

系统还包含了安全预警管理和信息提醒子系统,一旦有数据异常产生的报警,系统会自动分级响应。根据报警的重要程度,可分别向现场监测人员、风机运行管理人员、项目经理等发送报警信息,并且本系统具有较好的网络拓展功能,根据施工现场风机的分布情况很方便地进行拓展。

## 1.2 硬件系统设计

风机上的自动检测装置,即现场测控单元,包含振动监测单元、结构安全监测单元、腐蚀电位监测单元、网络通信单元和电源模块等,是自动化监测系统的关键设备,它决定了系统的功能和性能,具有本地采集、就地存储、远程控制等功能,可采集的物理量包括电压、电流、电阻、频率等各类有源或者无源传感器,具有同时采集振动数据、结构应力数据、腐蚀电位数据的功能,并且可以自动上报采集结果。

### 1.2.1 振动监测单元

振动监测单元由高速采集卡、嵌入式控制器组成,本单元主要完成单台风机基础上振动加速度的监测,可同时兼容两分量和三分量加速度传感器,采样速率可达到1 000 Hz,可采用软件触发和可编程定时器触发采集,采样定时精度高,通过嵌入式系统软件开发,可以根据现场需要设置各种采集参数,具有在线多通道实时数据动态监测和脱机数据存储与分析等功能。系统结构图如图2。

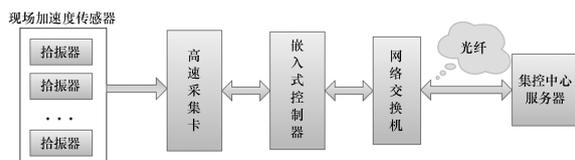


图2 振动监测单元

数据采集软件在振动检测单元中的嵌入式控制器内运行,根据集控中心服务器设置的硬件采集参数、傅里叶变换参数、数据存储与显示参数,通过硬件中断的方式从高速采集卡的缓存中获取的数据,以曲线形式进行直观显示,根据传感器的标定参数和系统采集的传感器初始值对原始数据进行处理,计算出实际测得的加速度值,并对采集的数据进行消除直流分量、低通滤波等信号处理,然后进行快速傅里叶变换(FFT变换)计算出相应的功率谱,具有在线多通道实时数据动态监测功能,并在本地进行存储,本系统进行数据存储时具有两种模式,一种是定时、定长的数据存储,其中采集周期、采集时长、采样率可以通过集控中心服务器进行设置,如,每间隔1 h存储5 min,主要是长期连续存储,数据以指定长度进行保存。另外一种为超限存储,当检测到通道内加速度数值超过预设的阈值以后,系统自动存储当前时间点、当前通道内的加速度数据,并进行分析存储,主要用于记录风电基础的异常振动,尤其台风期间,机舱会随着风向的变化发生偏航事件,进而会产生强烈的振动信号,冲击振动的时间虽然较短但是由于振幅很大,因此冲击振动也是影响风机基础健康状况的主要因素之一,因此需要重点关注。

### 1.2.2 结构安全监测单元

结构安全监测单元由数据采集控制器、数据

采集模块组成,是一种通用型安全监测仪器,结构安全监测单元将现场埋设的各种传感器信号如:钢板应力计、应变计、无应力计、倾角仪等传感器信号通过防水电缆接到结构安全监测单元内的数据采集模块上,数据采集模块在数据采集控制器的控制下根据预设的采样频率对传感器进行数据采集,数据采集控制器下面可以接多个测量模块,采集的数据通过 RS485 总线进行上报,可以通过串口转换器转换成网络信号然后通过光纤和集控中心的数据服务器进行数据交互。系统结构图如图 3。

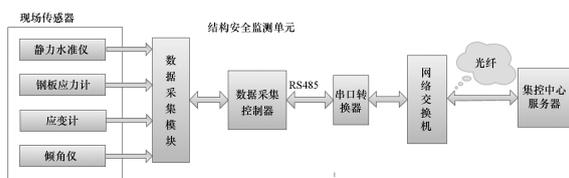


图3 结构安全监测单元

### 1.2.3 腐蚀电位监测单元

牺牲阳极的阴极保护技术作为一种能有效地防止金属腐蚀的电化学方法,其原理将还原性较强的金属作为保护极,与被保护金属相连构成原电池,还原性较强的金属将作为负极发生氧化反应而消耗,被保护的金属作为正极就可以避免腐蚀<sup>[3]</sup>。因这种方法牺牲了阳极保护了阴极,避免或减弱腐蚀的发生,已被广泛应用于船舶、港湾以及海洋工程中。海上风电基础结构水下部分通常采用的防腐蚀措施是:涂层+牺牲阳极阴极保护法。根据相关规范的规定,合理的阴极保护范围为:  $-0.78 \sim -1.05\text{V}$ (海水  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  参比电极),如果低于这个下限则会导致“过保护”的现象,加速被保护结构的腐蚀,如果高于这个上限,则处于“欠保护”状态。因此,采用阴极保护的结构是否完全处于被保护的范畴之中是在整个使用期需要时时关注的最重要指标<sup>[4]</sup>。

腐蚀电位监测单元由参比电极、信号转换器、数据采集控制器、数据采集模块组成。系统结构图见图 4。

### 1.2.4 网络通信单元

根据现场风机的布置和海缆的走向,设计海上

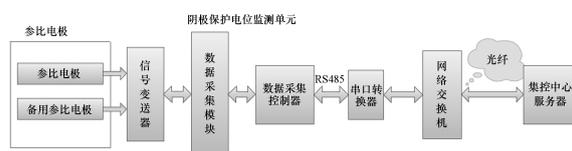


图4 腐蚀电位监测单元

风电基础结构远程自动监控系统的网络拓扑见图 5。

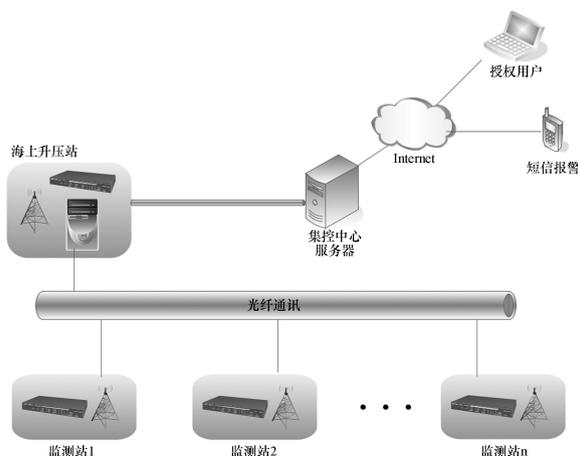


图5 系统网络拓扑

一台风机为一个监测站,包含振动监测单元、结构安全监测单元和腐蚀电位监测单元,在监测站内部,振动监测单元通过以太网连接到工业级光纤路由器,结构安全监测单元和腐蚀电位监测单元通过 RS485 总线连接到串口转换器,然后转换成以太网连接至光纤路由器,然后通过光纤路由器到海上上升压站,在风机和海上上升压站之间的光纤通讯可以根据海缆的走向采用星型拓扑结构或者环形拓扑结构,优先采用环形拓扑结构,最后通过海上上升压站和陆上集控中心之间的光纤通信网络把数据传输到集控中心服务器,集控中心服务器采用双网卡配置,通过服务器转发规则进行外网发布,不同的授权用户按照权限通过计算机、手机等终端实时访问集控中心服务器,实时查看监测信息成果,查看现场监测设备工作状态,并可以随时对监测频率等参数进行调整。

### 1.2.5 供电系统

海上风电基础结构远程自动监控系统在现场监测单元和通信模块安装在风机塔筒内部,可以使

用交流、直流两种供电方式,可根据现场情况灵活选用,如现场具备交流供电条件,则优先选用交流供电系统,系统配后备电池,具有电源自动管理功能,交流电正常时,限流恒压充电功能启动,蓄电池为现场监测单元和通讯单元进行供电,这样避免了交流电转换直流过程中的交流成分,供电系统波纹系数较低,这样有利于提供监测数据的精度。如果意外断电,系统可以通过后备电池供电,于数据采集系统采取低功耗设计,后备电池容量可以保证监测单元在系统断电后工作1周以上,由这样最大限度的保证了系统数据的安全。

### 1.3 系统软件设计

为了能够更加系统的、全面的和即时的管理海上风电基础结构监测单元所获得的信息成果,需要建立一套海上风电基础结构远程自动监控系统加以实现。该信息化平台基于B/S系统架构实现,部署于WINDOWS平台的服务器中,通过互联网方式即可访问。

信息系统主要包含以下模块:风机管理、监测内容管理、测点部署、数据检索、图表统计、监测数据异常预警、监测/检测报告管理、监测项目资料发布等;信息系统数据监测服务能够通过系统制定的通信协议与采集策略自动采集监测数据,同时实现预警功能。海上风电基础结构安全监控系统平台已在东海风电场、中广核如东风电场、鲁能东台风电场等项目中取得了较好的成果,并充分利用远程自动化监测的方式实现了无人值守状态下的数据采集功能。

#### 1.3.1 风机管理功能

该模块由系统管理员录入风场内风机的信息,录入需要监测的风机编号等基本信息,可导入风场布置图,正在监测的风机可以高亮显示,处于异常状态的风机可在界面上进行报警提示,点击风机可以查看该风机详细测点信息。

#### 1.3.2 监测内容管理

测点管理是将监测风机、监测仪器信息、仪器安装位置、被测的物理量、通讯单元、预警信息等进行一一对应。监测内容管理需要信息化录入人员录入测点所划分的区域名称及相关信息。监测仪器

信息则是录入仪器设备的参数配置值,该值用于自动化监测设备的运行,同时是仪器与信息系统进行数据交互的参数设置。仪器安装位置则通过形象的图形展示界面设置,系统可通过FLASH三维测点安放插件形象的设置测点安放位置传输信息,该信息在需要自动化监测的仪器设备中提供设置传输方式、数据包大小、心跳包频率等信息,用于仪器与信息系统的交互功能;预警信息设置测点对应的预警上限与下限值,信息化系统通过数据可自动判断是否满足预警状态,从而触发信息系统预警机制。

#### 1.3.3 数据管理

海上风电基础结构远程自动监控系统监测数据信息量相当庞大,数据类型多种多样,数据的收集、归档、存储和分析给数据采集人员带来了一定的难度,通过支持自动化采集的仪器参数设定并预先对该仪器的传输协议和传输方式进行二次开发,形成与平台能够进行自动化数据传输功能,从而实现无人值守状态下的数据采集,系统通过光纤转以太网通讯,采集的数据备份到数据库中,数据库管理系统采用SQL Server2008标准版,另外现场监测单元也对数据进行数据冗余存储机制,最大限度地保证了数据的安全。

#### 1.3.4 数据展示

通过图形化的展示形式实现了的数据信息展示,信息系统通过录入的测点信息、测点位置信息和测点实测工程量信息等形成一个模拟的风机,在风机各个断面对应的测点处展示该测点的最后一次监测数据。同时,通过颜色的区别显示该测点的状态,可以通过鼠标点击进入该测点的详细监测数据查询,以及历史监测数据查询等界面。

#### 1.3.5 数据统计

信息系统建立的数据统计功能可根据用户要求展示监测数据对应的统计分析图表,帮助监测人员了解监测数据的发展趋势与变换轨迹。用户可以通过监测内容、测点、监测时间等灵活多变的数据筛选条件,可自动生成“应力-时间”、“倾角-时间”曲线等,可帮助监测人员分析该测点的监测数据变化情况,既可以分析单一测点在不同时间段内

的变化曲线,也可选择同一时间段内不同测点的数据变化曲线进行对比分析。

### 1.3.6 数据检索

系统提供多种数据列表的检索,可通过业务流程定制各种数据检索列表,默认平台中提供原数据列表和图形化的浏览界面。强大的数据筛选条件功能使用户能够快速定位测点信息与测点监测数据。图形化浏览界面中直观的展示 2D 施工图纸中的每个测点监测信息,并通过不同颜色标记测点数据的健康状态。

### 1.3.7 监测报告

信息化管理平台提供定制菜单管理不同类别的监测和检测报告,监测人员可根据业务管理需要制定对应的报告分类,一般分为日报、周报、月报和阶段性报告,上传报告文件可支持: Word、Excel、PDF 等文件格式。同时,系统对上传的文件报告进行浏览记录、下载记录的跟踪,追溯到每位查阅报告的人员何时浏览或下载报告。

## 2 结论

基于物联网技术的海上风机基础结构远程自

动化监测技术的应用,可以实现远程自动获取海上风机基础结构的实时状态,系统采用模块化设计,可兼容多种类型传感器,系统兼容性、灵活性较强,对目前的风电监测市场有较强的适应性,对于掌握基础结构的健康状态有非常重要的作用,同时监测数据可以为优化海上风机基础结构提供基础数据支撑,对于海上风电场的健康发展有着重要的意义,目前已经成功地应用于平海湾风电场、中广核如东风电场、东海大桥风电场等多个项目中,取得了良好的社会效益,具有广阔的推广前景。

## 参考文献

- [1] 林毅峰,李健英,沈达,等.东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计[J].上海电力,2007(2):153-157.
- [2] 舒方法,杨三元,张羿,等.东海风电场海上风机基础结构阴极防护远程监控系统研究[J].港工技术与管理,2013(1):47-51.
- [3] 翟玉泰,于东海.浅析防雷接地装置的防腐问题[C]// 广西省气象学会 2011 年学术年会.2011.
- [4] 张羿,张开华,舒方法,等.海上风电基础结构阴极保护监测装置:CN,CN 202954096 U[P].2013.