

# 海上风力发电机组的整体软着陆安装

乌建中, 郭庆广, 张 珍

同济大学机械工程学院, 上海 200092

**摘要** 针对海上风力发电机组安装, 分析了海浪载荷对风机安装的影响, 建立了海浪载荷下风机运动学模型, 对其进行了仿真。按照安装要求和仿真结果提出了风机软着陆安装方案, 分析了风机各个阶段的运动状态。采用液压蓄能器作为缓冲蓄能装置, 使液压缸可以快速跟随上部吊架系统运动, 实现整个软着陆过程只有一次撞击。提出了电液比例控制技术和加速度传感器反馈相结合的控制模式, 使系统既有缓冲作用, 且缓冲的加速度闭环可控, 又可切换到同步升降模式调整风机姿态, 克服了完全被动缓冲的不可控性、难以进行姿态调整及模式转换的衔接问题, 提高了安装的灵活性, 实现了风机的软着陆安装。

**关键词** 软着陆安装; 海浪载荷; 液压缓冲; 比例流量控制; 加速度控制

**中图分类号** TP29

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2009)22-0054-04

## Overall Soft Landing Installation of Offshore Wind Turbine

WU Jianzhong, GUO Qingguang, ZHANG Zhen

College of Mechanical Engineering, Tongji University,  
Shanghai 200092, China

**Abstract** This paper analyses the effect of ocean wave loading on the wind turbine installation, and proposes a kinematic model for the wind turbine under the ocean wave loading, with which some simulations are carried out. A scheme of wind turbine soft landing is put forward according to the installation requirements and simulation results. The wind turbine movement states of the various stages are analyzed. Hydraulic accumulators are used as buffer storage devices, so the hydraulic cylinders can quickly follow the movement of the turbine interface frame, with only one impact during the landing. A control mode is proposed to combine the hydraulic proportional control technology with the acceleration feedback, which not only can accomplish a buffer action and make the buffer acceleration controllable in a closed loop, but also can be switched to the mode of synchronous movement to adjust the wind turbine gesture. Comparing with a completely passive buffer, which is not controllable, and difficult to adjust the gesture of the wind turbine and to accommodate different modes, it has greatly enhanced the flexibility of installation and achieves a soft landing

for the wind turbine installation. At the same time it also has laid a foundation for further research of its control algorithm and reliability.

**Keywords** soft landing installation; ocean wave load; hydraulic buffer; proportional flow control; acceleration control

## 0 引言

风能是一种清洁、廉价、储量极为丰富的可再生能源, 开发风力发电是解决能源危机、缓解温室效应、实现经济可持续发展的有效途径<sup>[1]</sup>。中国首个海上风电场——东海大桥 100 MW 风电场示范项目, 目前已完成 3 台单机容量为 3 MW 风机的安装且成功并网发电。作为海上风力发电机组安装的关键, 须使整个安装过程风机的加速度小于 0.25g, 由于海浪载荷的作用, 风机在吊装过程中上下左右颠簸, 这对软着陆系统提出极高的要求。可控的液压缓冲采用电液比例阀和液压蓄能器实现风机振动时向下缓冲、向上跟随, 且可吸收液压冲击和压力脉动<sup>[2]</sup>, 实现风机安装的软着陆。采用加速度传感器反馈, 使缓冲加速度闭环可控, 并且在缓冲结束后可转换为同步升降模式, 实现风机的姿态调整, 克服了完全被动缓冲的不可控性、难以进行姿态调整及模式转换时衔接问题<sup>[3]</sup>。本研究建立了软着陆系统模型及控制策略, 分析了软着陆过程及其控制参数的计算问题。

## 1 海上风机整体安装工艺流程

根据风机安装要求提出的风机软着陆安装体系, 主要由上部吊架系统、吊索和平衡梁系统、下部就位系统、自动对中系统<sup>[4]</sup>、软着陆系统、中央控制系统等部分组成。其中上部吊

收稿日期: 2009-07-21

基金项目: 上海市科学技术委员会资助项目 (08DZ1200600)

作者简介: 乌建中, 教授, 研究方向为机电液控制技术, 电子信箱: wjz@tongji.edu.cn

架系统、吊索和平衡梁系统用于完成海上风力发电机组的陆上组拼和海上吊装运输;下部就位系统和软着陆系统是海上风力发电机组在海上实现软着陆安装的核心。作为海上风电机组柔性安装体系的重要组成部分,软着陆系统由 8 个液压缓冲装置及其控制系统组成,用于完成对上部吊架系统的缓冲、同步下降及姿态调整使风机平稳落于海上基础平台上。风机软着陆安装体系如图 1 所示。



图 1 风机软着陆安装体系

Fig. 1 Wind turbine soft landing installation system

## 2 海浪载荷影响分析

东海大桥风电场位于近海,海浪波周期约为 5 s,一般安装工况海浪的最大允许起伏为 $\pm 650$  mm,所以可将海浪波动模型简化为正弦模型<sup>[5]</sup>,将海浪作用下风机振动系统进行简化。起吊钢丝绳可简化为弹簧和阻尼器,钢丝绳的阻尼是由于各股钢丝绳之间的干摩擦引起的,在振动过程中可视为常数,根据图 1 风机安装系统简化振动模型如图 2 所示。

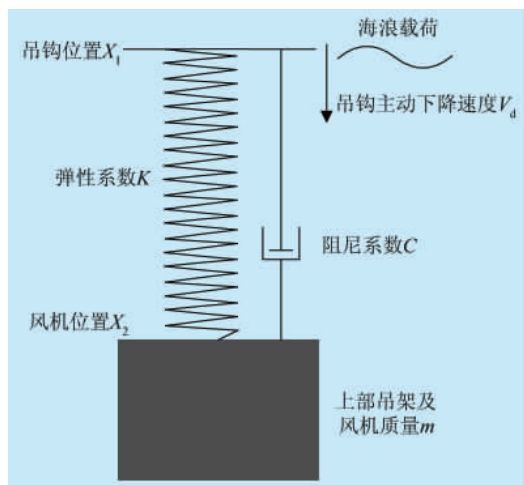


图 2 海浪载荷下风机振动简化模型

Fig. 2 Simple model of wind turbine vibration under ocean wave loading

海浪对安装船的作用比较复杂,这里将海浪运动简化为安装船运动,安装船的吊钩的运动规律为

$$X_1(t) = B \sin(\omega t + \theta) - V_d t + n \quad (1)$$

其中,  $B$  为吊钩运动振幅,  $n, \omega$  为常数,  $\theta$  为初相位,  $K$  为风机起吊钢丝绳弹性系数。忽略空气阻尼,  $C$  为钢丝绳的阻尼系数,可得

$$m \ddot{X}_2 = K(X_1 - X_2) + C(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) \quad (2)$$

故其传递函数为

$$G(S) = \frac{X_2(S)}{X_1(S)} = \frac{CS + K}{mS^2 + CS + K} \quad (3)$$

阻尼比为

$$\xi = \frac{C}{2m} \quad (4)$$

在波浪幅值为 $\pm 0.65$  m 情况下进行 Matlab 仿真,分别得到风机的速度曲线和加速度曲线,见图 3、图 4。

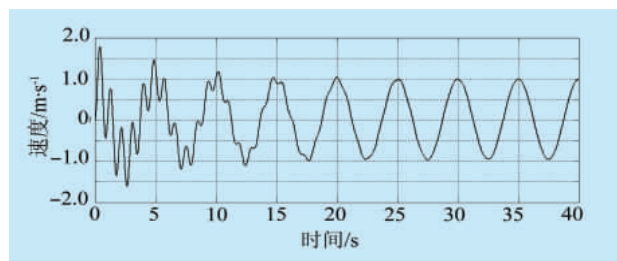


图 3 风机速度曲线

Fig. 3 Wind turbine velocity curve

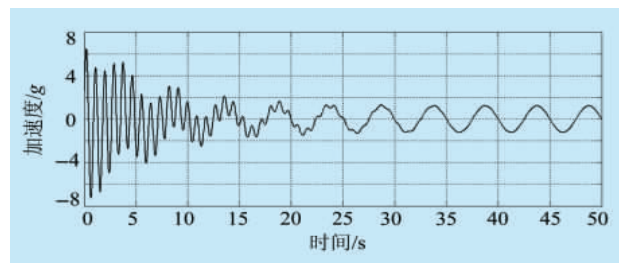


图 4 风机加速度曲线

Fig. 4 Wind turbine acceleration curve

从仿真结果可知,风机在波浪作用下的运动规律,参考其运动规律制定软着陆方案。

## 3 软着陆方案及控制策略

根据海上环境和风机的安装要求,整个软着陆过程经过若干步缓冲蓄能和跟随完成。

1) 下降缓冲准备阶段。在安装时,缓冲液压缸先完全伸出,系统准备开始缓冲,吊钩以速度  $V_d$  下降。

2) 缓冲蓄能阶段。当缓冲液压缸接触到下部就位系统时,根据压力传感器发出的压力信号及加速度传感器反馈,通过电液比例流量阀控制,使上部吊架减速直到静止在平台

上方,液压缓冲液压缸被强制压下,向蓄能器充油,此时蓄能器蓄能。

3) 快速跟随阶段。当上部吊架再次被钢丝绳拉起时,液压缸在蓄能器中油的推动下跟随上部吊架系统运动,此时根据压力变化调整比例调速阀的开口大小,利于快速跟随,直到拉到最高点后进行下一步缓冲。

4) 承重静止阶段。每经过一次缓冲-跟随循环后,风机的振动能量被比例调速阀节流效应消耗,直到吊钩完全放松,风机静止不再被拉起,缓冲结束。软着陆过程曲线见图5。

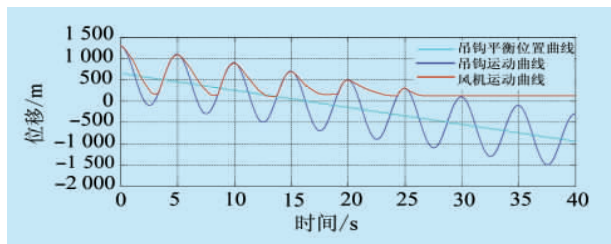


图5 软着陆过程曲线

Fig. 5 Soft landing process curve

### 3.1 软着陆关键阶段分析

1) 快速跟随阶段。在此阶段液压缸的流量由蓄能器和泵两部分供给,根据8个液压缸承重要求确定液压缸参数:上部吊架系统质量  $m=500\text{ t}$ ,液压系统额定压力为  $25\text{ MPa}$ 。设液压缸内径为  $D$ ,活塞杆直径为  $d$ ,活塞行程为  $L$ ,向上跟随最大速度为  $V_{\max}$ ,参照  $\pm 0.65\text{ m}$  海浪的仿真曲线可得在上升跟随过程中最大流量为

$$Q_{\max}=V_{\max} \cdot \frac{\pi d^2}{4}=1200\text{ L/min} \quad (5)$$

利用蓄能器和两个液压泵联合供油及差动方式可以满足快速跟随时所需流量。

2) 缓冲蓄能阶段。在缓冲应用中,完全无冲击缓冲和等减速缓冲的应用比较广泛。完全无冲击型缓冲要求速度连续而无突变,且加速度连续而无突变;等减速缓冲虽然无速度突变,即无硬冲击存在,但在缓冲起点和终点都存在加速度突变,即存在软冲击<sup>[6]</sup>。对照海上风机安装要求,在缓冲行程较短时,完全无冲击型缓冲很难达到缓冲加速度要求,等减速缓冲尽管存在软冲击,但计算得出的加速度峰值较小,且等减速缓冲使速度均匀变化,能均匀吸收系统的动能。故选用等减速缓冲。软着陆控制系统如图6所示。

设蓄能器充气压力为  $P_0$ ,对应的气体的容积为  $V_0$ ,蓄能器工作时压力为  $P_g$ ,液压缓冲过程蓄能器中的气体可以认为绝热变化  $k=1.4$ <sup>[7]</sup>,故蓄能器工作时气体的体积为

$$V_g=\sqrt[1.4]{\frac{P_0 V_0^{1.4}}{P_g}} \quad (6)$$

通过压力传感器可测得  $P_g$ ,由式(6)求得  $V_g$ ,通过控制系统对压力传感器不断地采样,可得到蓄能器工作时气体体积变化  $\Delta V_g$ ,进而得到液压缸大腔流量  $Q_1$ 。液压缸上的行程传感器可测得液压缸的位置。同样,控制系统对行程传感器不断

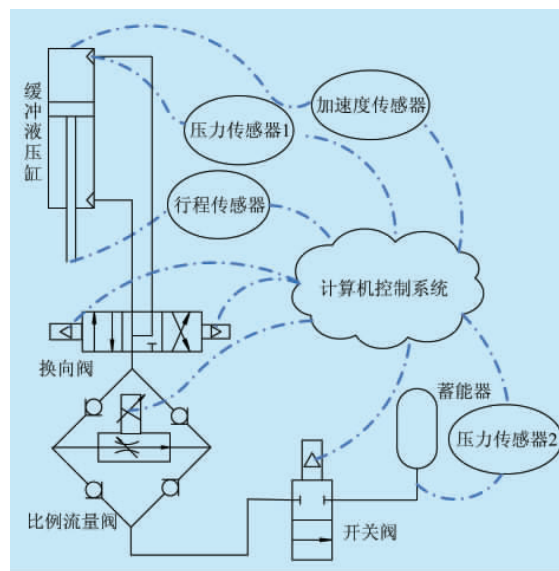


图6 软着陆控制系统简图

Fig. 6 Soft landing control system

采样,可得到液压缸运动速度,进而得到液压缸大腔流量  $Q_2$ ,两者比较可得到较为准确的液压缸大腔流量  $Q$ 。

比例流量阀进出油口的压差为

$$\Delta P=\frac{\rho}{C_A^2 A_T^2} Q^2 \quad (7)$$

其中,  $\rho$  为液压油密度,  $A_T$  为比例阀开口面积,  $C_A$  为流量系数,  $Q$  为通过比例流量阀的流量。

在缓冲时,通过压力传感器测得液压缸大腔油压  $P$ ,而大腔面积为  $A$ ,进而可得缓冲加速度为

$$a=\frac{PA-mg}{m} \quad (8)$$

通过控制比例流量阀开口大小来控制缓冲加速度,通过加速度反馈控制<sup>[8]</sup>,实现以基准加速度  $a_0$  为加速度的匀减速缓冲。匀减速控制如图7所示。

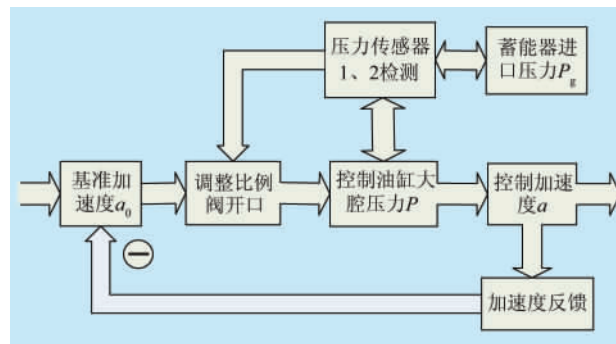


图7 匀减速控制图

Fig. 7 Uniform deceleration control

3) 二次快速跟随及承重静止阶段。在缓冲蓄能阶段蓄能器充油,由于跟随距离短、速度慢,二次快速跟随阶段所需最大流量小于第一次快速跟随时的流量,故两个液压泵和液压蓄能器可以满足流量需求。当液压缸静止时,压力传感器多

