[风电]

一种基于CNN-LSTM风向预测的风电机组偏航控制方法

文/叶　锋[1]　林周泉[2,3]　李宁波[1]　屠银潮[1]　司　琦[1]
1. 国电宁波风电开发有限公司；2. 浙江运达风电股份有限公司；3. 浙江省风力发电技术重点实验室

良好的偏航控制方法不仅可以保证风电机组的对风精度，提升发电量，又可以降低机组载荷，延长机组的使用寿命。针对常规偏航控制方法存在的不足，提出一种基于CNN–LSTM风向预测的偏航控制方法，充分利用一维卷积网络和长短期记忆网络在时间序列预测方面的优势，通过前期的风向时间序列数据处理实现风向的准确预测。

风电机组偏航控制系统的主要功能是在风速矢量的方向发生变化时，能够使风轮快速平稳地对准风向，以便风轮最大限度获得风能，提升风能利用率。精确、实时的风向预测，不仅有利于风电机组保持最大风功率跟踪，提高风能捕获量，同时对降低机组的运行载荷也具有重要意义。因此，开展风电机组风向的实时预测，对风电场的经济安全运行和风电机组的性能优化均具有重要的理论意义和工程应用价值。本文将开展风电机组偏航控制系统以及控制方法的研究，针对常规偏航控制方法控制滞后引起的风电机组频繁偏航、偏航误差大的问题，提出了一种基于CNN-LSTM风向预测的偏航控制方法，充分利用一维卷积网络和长短期记忆网络在时间序列预测方面的优势，数据经过CNN的卷积和池化处理，实现对数据特征的提取和降维；然后再通过LSTM学习数据间的时间拟合关；最后基于CNN-LSTM拟合训练好的数据并通过全连接神经元网络输出风向预测值。偏航控制系统根据预测的风向执行偏航控制，可以避免因风向快速变化引起的频繁偏航，同时还可以减小机组的偏航误差。仿真结果表明，与常规的偏航控制方法相比，基于CNN-LSTM风向预测的偏航执行控制方法可以减少风电机组偏航误差，提升发电量。

风向数据处理

为了给偏航风向预测模型的建立提供数据支撑以及理论依据，本文采用Molas NL机舱式激光雷达采集风力发电机组运行时的风向数据。激光雷达在风电机组中的测风应用如图1所示。

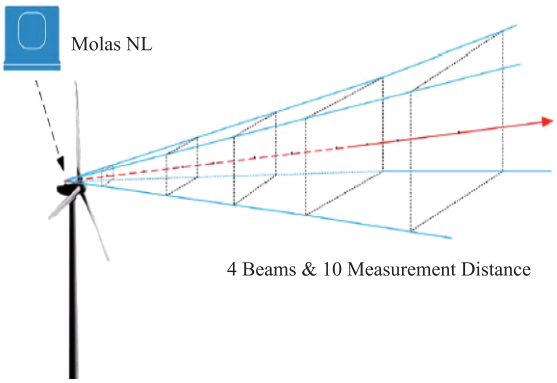

图1　激光雷达测风应用示意图

Molas NL机舱式激光雷达技术参数见表1。

表1　Molas NL机舱式激光雷达技术参数

项目	参数
测量距离/m	50～200
光束结构	4光束，水平面夹角30°，垂直面夹角25°
测量频率/Hz	4
视向风速范围/（m/s）	0～50

（续）

项目	参数
风向测量范围（°）	0～360
风速精度/（m/s）	0.1
风向精度（°）	±0.5
姿态水平度精度（°）	±0.1
激光束安装精度（激光束与光学轴）（°）	0.1
工作温度范围/℃	－40～60
生存温度范围/℃	－40～65
工作湿度范围/RH	0～100%
工作海拔/ m	≤3 500
工作加速度范围/g	－0.5～0.5

风向是实时变化的，并且在一定的时间尺度范围内，由于大气的不可压缩流动性和惯性，导致风向存在周期性的变化，即风向会在一定角度范围内来回摆动。本文采用浙江沿海某风电场2022年2月25日～3月26日连续30天的风向数据进行统计分析，每10 min为一个采样周期，风向值范围为0°～360°。风向的统计结果如图2所示。

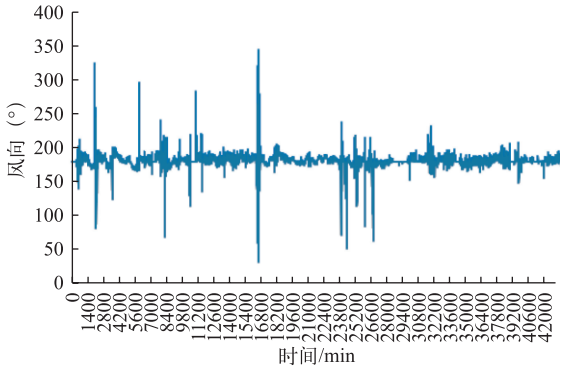

图2　浙江沿海某风电场30天风向数据统计图

从图2中可以看出，在某些时间段，风向值保持不变，并不随时间变化，但风向保持不变的情况出现的时间段具有明显的周期性。因此，通过风电机组采集的风向历史数据对未来某个时刻的风向进行预测是合理可行的。

常规风电机组偏航控制系统及方法

偏航控制系统是风电机组中一个重要的组成部分，对于风电机组高效、稳定运行具有重要的意义。偏航控制系统的主要功能有三个方面：一是在风向发生变化时，与主控系统配合，使风电机组快速准确的对风，提高机组的风能捕获效率；二是通过偏航解缆防止风电机组的电缆由于单向缠绕过多造成电缆断裂；三是在风电机组出现超速的情况下执行90°测风偏航来降低转速和载荷，保证机组安全稳定运行。

风电机组风向测量的原理如图3所示。

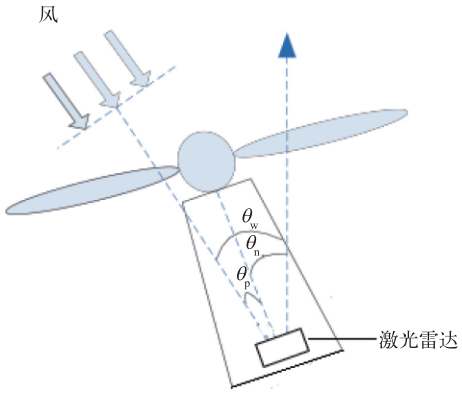

图3　风电机组风向测量原理

由于激光雷达与机舱是同时旋转的，因此实际测量的角度是偏航误差而不是风向。

除了激光雷达之外，风电机组还有一种用于偏航控制系统的传感器，即机舱位置传感器。实际的偏航误差是风向和机舱位置之间的差异，其计算公式为

$$\theta_p=\theta_w-\theta_n \tag{1}$$

式中，θ_p为偏航误差角；θ_w为风向角；θ_n为机舱位置角。

常规的风电机组偏航控制方法采用的是负反馈的控制策略。将激光雷达测得的风向信号传送给偏航控制器，偏航控制器根据设定的控制策略处理数据，并给偏航执行机构发出指令进行左偏航或右偏航操作，调整机组的对风角度，达到最佳风能捕获。工作原理图如图4所示。

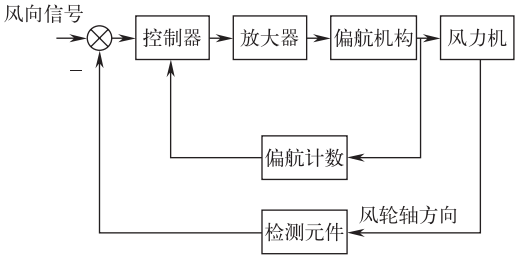

图4　偏航控制系统工作原理图

偏航控制器主要有两个控制参数，即偏航误差角度阈值J和偏航误差持续时间阈值S。当风电机组的偏航误差持续大于角度阈值J且该状态持续时间超

过时间阈值S时，偏航系统通过偏航电动机带动机舱以一定速度转动进行对风，减小偏航误差。当偏航误差大于±8°时，偏航系统开始对风；当偏航误差小于±4°时，偏航系统停止对风，偏航结束。

目前主流的风电机组仍然采用常规的偏航控制方法，根据偏航角阈值及偏航延时时间执行偏航。常规的偏航控制方法在风向较稳定的工况下，基本满足风电机组的对风要求，但是当风向变化频繁时，则很难满足对风要求，同时缺少对风电机组输出功率及偏航次数的综合特性分析，无法有效提升风电机组的发电效率和性能。

优化后的风电机组偏航控制方法

常规的偏航控制算法主要取决于机组测量得到的偏航误差历史数据。同时为了处理偏航误差测量的干扰问题，偏航控制系统通常用平均或低通滤波器来处理，但这也可能带来偏航系统的响应延时，降低风电机组的发电效率。此外，滤波后的风向测量值仅反映过去一段时间的机组偏航误差，并且可能与未来的风向不同。因此，本文提出了一种基于风向预测的偏航控制方法，能够解决常规偏航控制方法滞后性的问题，降低偏航误差，提高风电机组的对风精度以及发电量，有效降低风电机组偏航次数，具有一定的实际应用价值。

长短时记忆网络（LSTM）是较为优秀的用于时间序列学习任务的深度学习体系结构之一，十分擅长对时间序列进行分类、处理和预测。而卷积神经网络（CNN）是以一定的模型对事物进行特征提取，并根据特征对该事物进行分类、识别、预测或决策等。本文将CNN与LSTM结合，建立风向预测模型并应用于风向预测。以LSTM为主体的预测模型在预测结果上基本达到要求，但对于某些风向突变的时刻，预测误差较大。并且当历史步长过大时，会消耗过多的模型训练时长，并且占用较大内存，降低算法的效率。而CNN善于捕捉特征，对数据进行深度的特征挖掘。因此将CNN与LSTM结合起来可以保留两者的优点，增加模型的深度，并进一步提高风向预测的精度。

本文方法包括两个部分，即风向预测模块和优化后偏航控制模块。风向预测模块是包含卷积神经网络和长短期记忆网络的CNN- LSTM深度神经网络模型，如图5所示。风向预测模型经过训练后的参数见表2。确认风向预测的模型以及参数后，首先对一段时间的风向数据进行处理，然后将处理过的数据和选定的风向历史数据输入到CNN-LSTM，CNN-LSTM拟合训练好的数据通过全连接神经元网络输出风向预测值，最终实现对风向时间序列的预测。

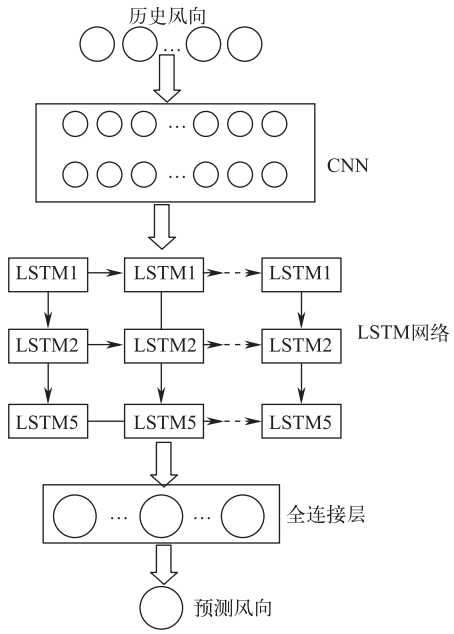

图5　基于CNN–LSTM风向预测模型

表2　超前5 min风向预测CNN–LSTM模型参数

网络层次结构	输出维度	参数
LSTM	None，10，20	2 440
Dropout	None，10，20	0
LSTM	None，10	1 640
Dropout	None，10	0
Reshape	None，10，1	0
Conv 1d	None，9，15	60
Conv 1d	None，8，15	1 365
Global average pooling 1d	None，15	0
Dropout	None，15	0
Dense	None，1	16

基于CNN-LSTM风向预测优化后的风电机组偏航控制方法如图6所示。该方法通过对风向的预测并结合风向变化趋势执行偏航，既能保证风电机组的对风精度，又可以有效避免因为风向突变引起的频繁偏航。

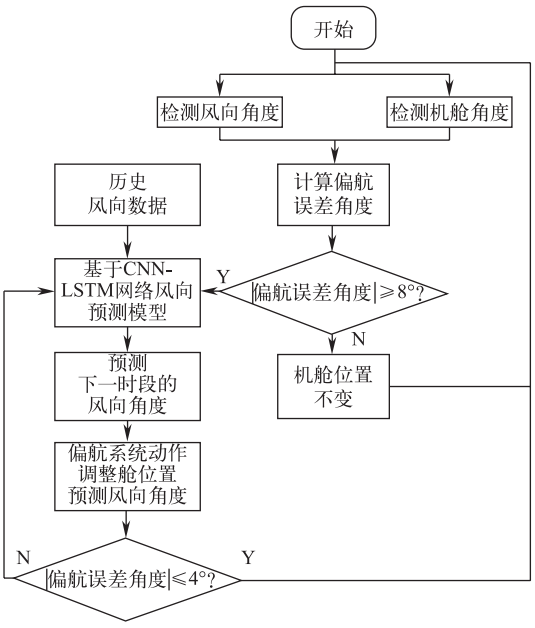

图6　优化后的风电机组偏航控制方法

仿真验证及结果分析

选取浙江沿海某风电场24 h的风向数据，分辨率为1 s，剔除部分异常数据后选取65 478个风向采样点作为研究对象，并将2022年2月25日～3月26日采样周期为10 min的风向数据作为历史风向数据输入，对优化后的偏航控制方法进行MATLAB仿真验证。结合常规偏航控制与基于风向预测的偏航控制方法的对比效果如图7所示。

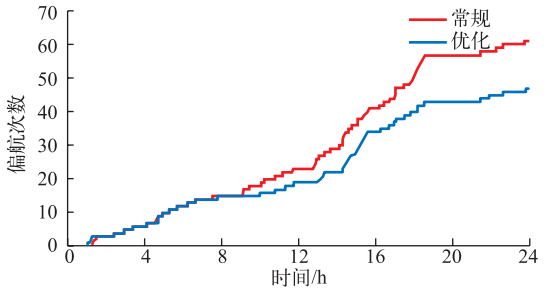

图7　偏航效果对比图

从图7可以看出，采用优化偏航控制方法机组与采用常规偏航控制方法的机组相比，偏航次数由60次降到40次，偏航次数减少了33.3%，效果明显。

编航误差仿真结果见表3。

从表3的仿真结果可以看出，常规的偏航控制方法基本上可以满足风电机组的偏航控制要求，在将近70%的采样时间内可以将偏航误差控制在允许误差±8°以内。而优化后的偏航控制方法更好地满足风电机组的偏航控制要求，在将近95%的采样时间内可以将偏航误差控制在允许误差±8°以内，说明优化后的偏航控制方法进一步减小偏航误差，具有更好的控制效果。

表3　偏航误差仿真结果

偏航误差范围	常规偏航控制方法		优化偏航控制方法	
	采样时刻数	所占百分比(%)	采样时刻数	所占百分比(%)
$\|e\|\leqslant 4$	217	21.7	426	42.6
$4\leqslant\|e\|\leqslant 8$	482	48.2	523	52.3
$8\leqslant\|e\|\leqslant 15$	189	18.9	42	4.2
$15\leqslant\|e\|$	112	11.2	9	0.9

综上所述，在风向变化频繁的情况下，采用基于CNN-LSTM风向预测的偏航控制方法，可以在提高风电机组对风精度的同时减少不必要的偏航动作。

结束语

本文提出了一种基于CNN-LSTM风向预测的偏航控制方法，根据预测的风向执行偏航动作，提高了风电机组的对风精度，同时可以避免因风向快速变化引起的频繁偏航。仿真结果表明，基于CNN-LSTM风向预测的偏航执行控制方法可以有效提高机组的对风精度，减少不必要的偏航动作，提升机组发电量。EA

（收稿日期：2022-06-21）

参考文献

[1] 魏昱洲．高铁线路风速风向短时局地预测方法研究[D]．北京：北京交通大学，2019．
[2] 陈露东，卢嗣斌，徐常．基于传统CNN-LSTM模型和PGAN模型的用电量预测对比研究[J]．电测与仪表，2020(10)：1-9．
[3] 唐振浩，赵赟楠，曹生现，等．基于SWLSTM算法的超短期风向预测[J]．中国电机工程学报，2019，39(15)：4459-4468．
[4] 路宏．基于风向预测的风电机组偏航控制方法研究[D]．北京：华北电力大学，2019．
[5] 荀晓玉，苏璨，李威，等．基于CNN-LSTM的煤矿瓦斯浓度预测[J]．现代信科技，2020，4(20)：149-152．
[6] 张东东．基于风向预测的风电机组偏航系统的研究[D]．乌鲁木齐：新疆农业大学，2014．