清華大學
Tsinghua University

基于海洋参数智能预测的荷载分析

Load Analysis Based on Intelligent Prediction of Ocean Parameters

2024. 06. 14 | 冯伟杰 郭金霄

Contents

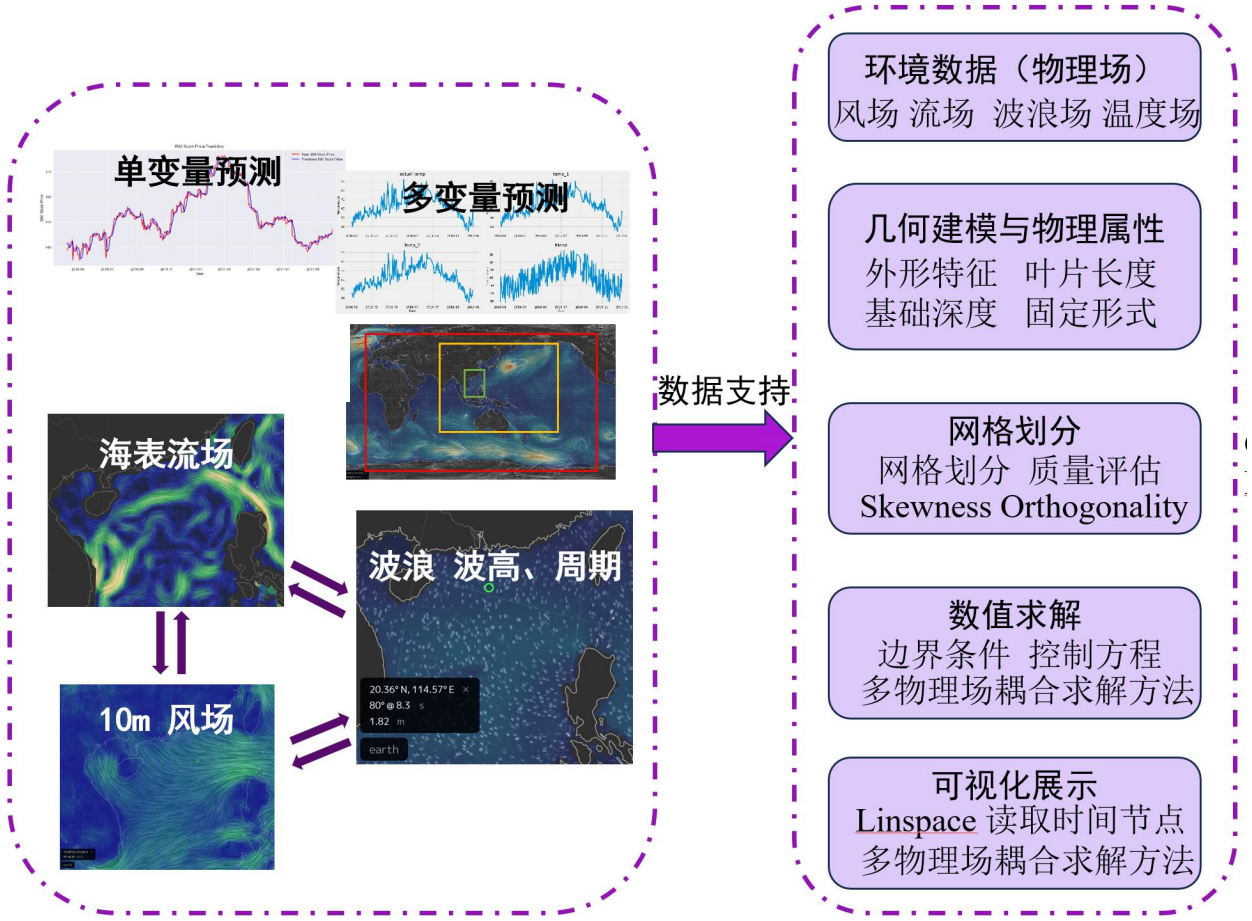
研究背景

- 海洋参数智能预测
- 海上结构荷载分析

研究内容

- 气象预测
- 荷载分析

研究成果



清華大學
Tsinghua University

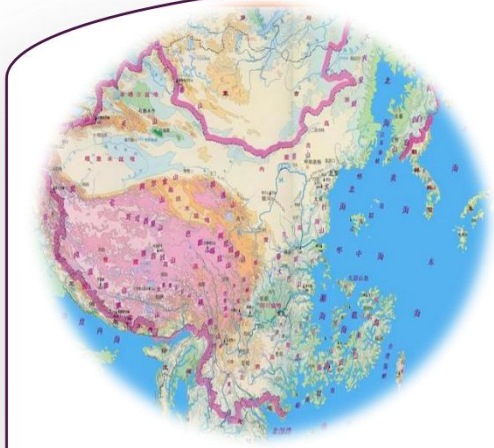
01 研究背景

Research Background

研究背景

研究内容

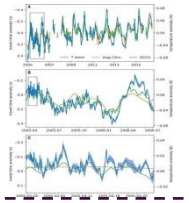
研究成果

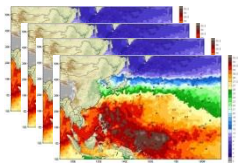


21世纪，人类进入了大规模开发利用海洋的时期。**海洋**在国家经济**发展格局和对外开放**中的作用更加重要，在维护国家主权、安全、发展利益中的地位更加突出，在国家生态文明建设中的角色更加显著，在国际政治、经济、军事、科技竞争中的**战略地位**也**明显上升**。

海上风力发电作为一种可再生能源，具有巨大经济潜力。**海上风机**需要面对复杂多变的海洋环境，包括风、浪、流等多种荷载的共同作用。研究荷载情况有助于确保风机在恶劣环境中的结构安全，避免灾难性故障和事故发生。

内容1：海洋环境气象数据的变异性





内容2：海上风机荷载计算的重要性

清華大學
Tsinghua University

02 研究内容

Research Content

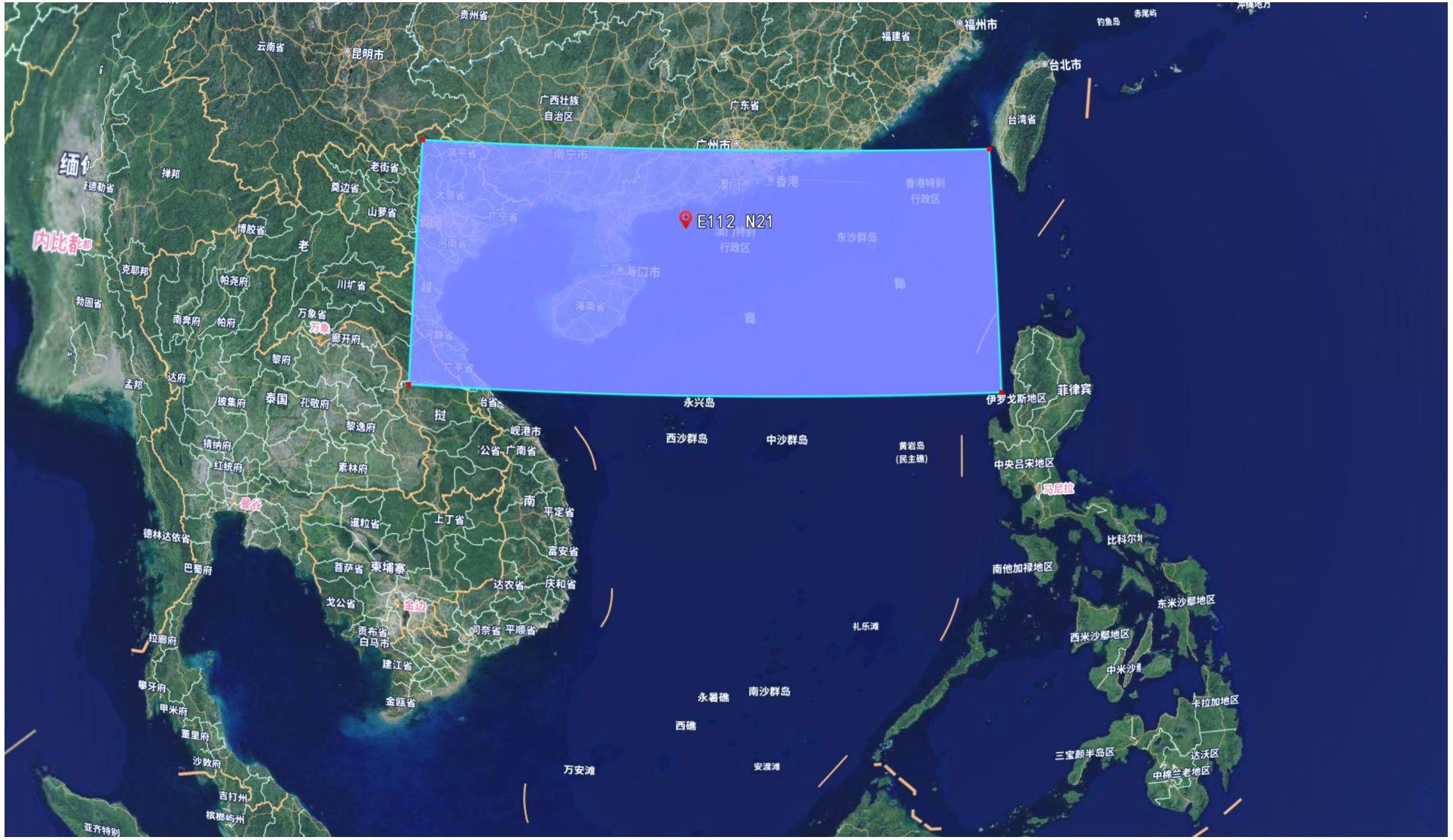
研究背景

研究内容

研究成果

研究区域：南海北部（E105-120 N17-23）

研究变量：地表10米风（U10、V10）、地表100米风（U100、V100）、海表流场（UV）、平均波方向（mwd）、平均波周期（mwp）、显著波高（swh）



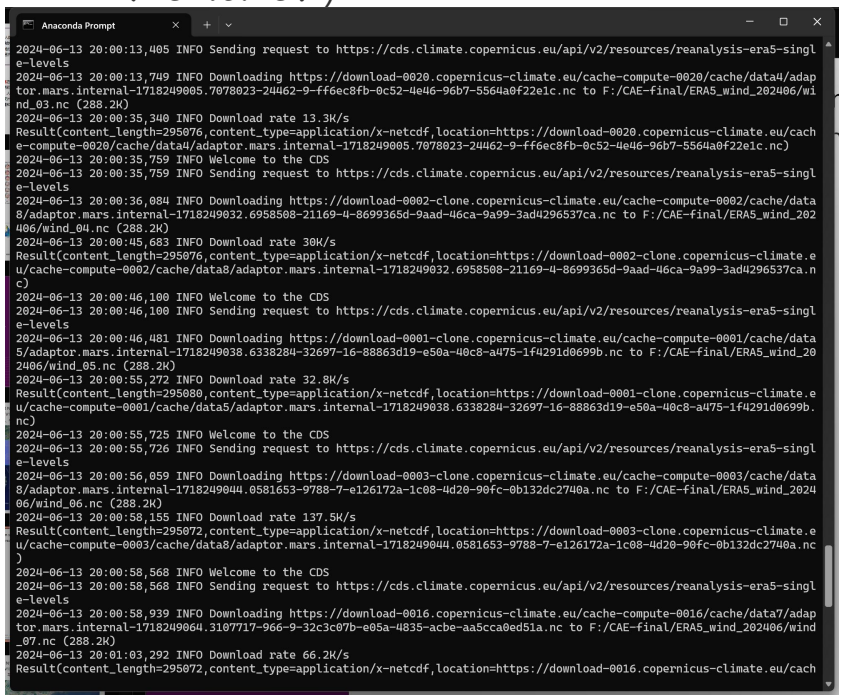
研究背景

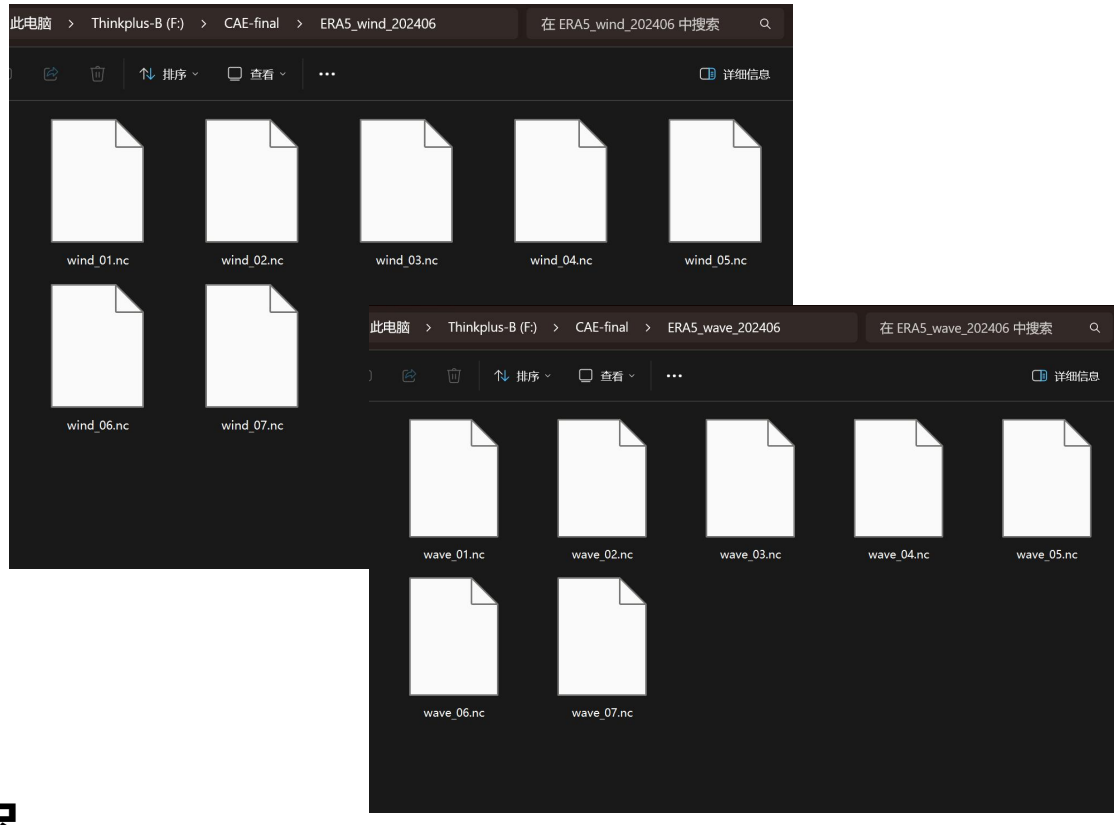
研究内容

研究成果

数据来源：ERA5 hourly data on single levels from 1979 to 2023

(The fifth generation ECMWF reanalysis for the global climate and weather)





ERA5数据每天更新，但有5-7天延迟。

风场数据不能和波浪数据同时下载，不然会导致数据错误！

风场网格精度为0.25°，波浪场网格精度为0.5°，流场数据用月平均值。

用于训练时，总共下载的数据时间点有394464个（1979-2023年每小时）。

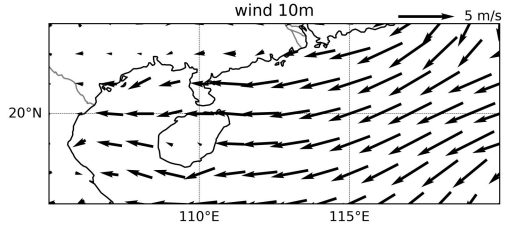
Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.adbb2d47

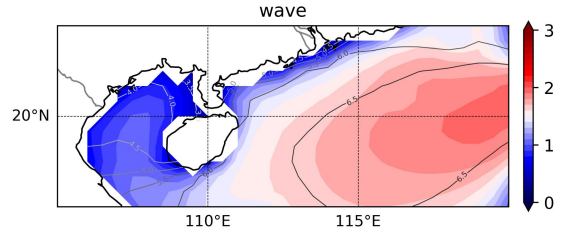
研究背景

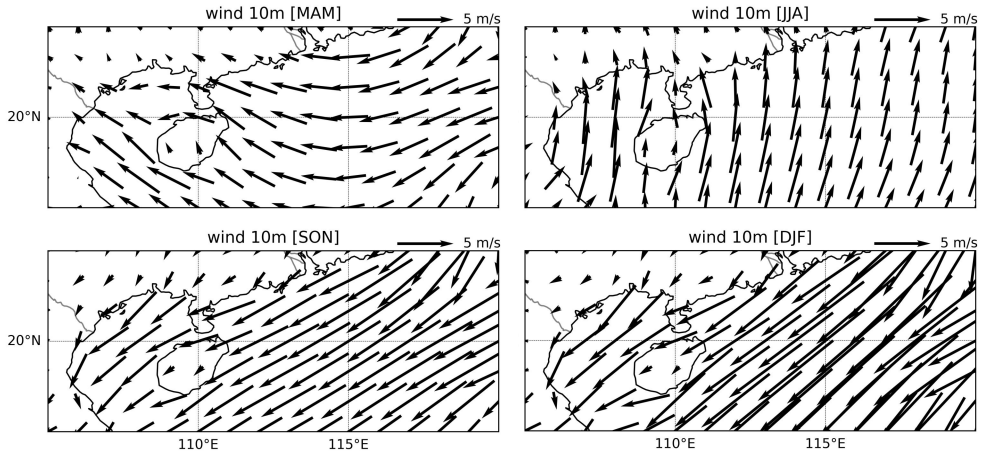
研究内容

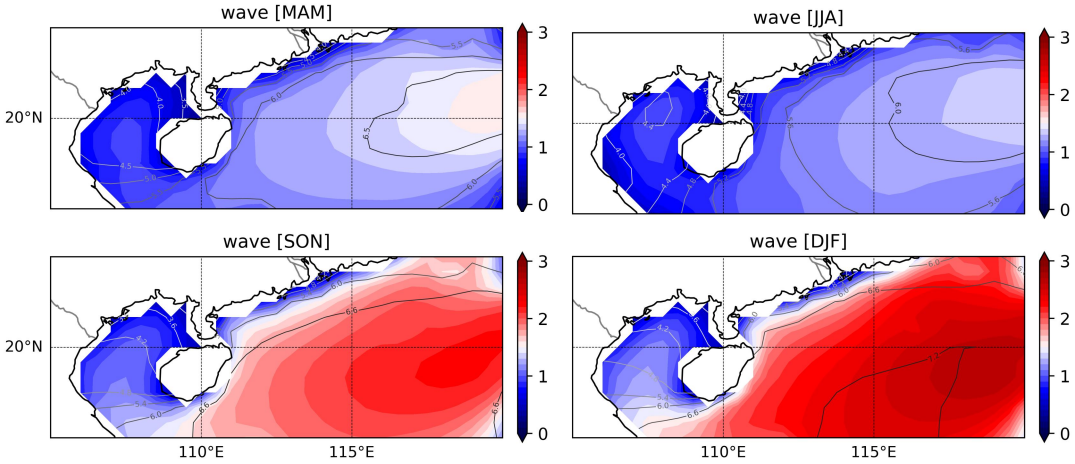
研究成果

研究区域气候状态









研究背景

研究内容

研究成果

单变量区域二维模型搭建

使用了Transformer架构，进行归一化处理，然后通过 Multi-Head Attention 层，结合自注意力机制对输入进行加权组合。接着应用了 Dropout（0.1） 以防止过拟合。最后，使用残差连接来构建输出。
接下来是 Feed Forward 部分，也经过归一化处理，然后通过一个全连接层，使用 ReLU 作为激活函数，再次应用 Dropout，最后再通过一个线性变换得到输出。

损失函数：均方误差（MSE）
优化器：Adam
评估指标：平均绝对误差（MAE）

变量：U100
数据量：[14464, 25, 61]（大约600天）
输入步长:输出步长 = 168:24
训练集:测试集:验证集 = 0.80:0.15:0.05
batch_size = 32；epochs = 5

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_1 (InputLayer)	[(None, 24, 1525)]	0	[]
layer_normalization (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['input_1[0][0]']
multi_head_attention (MultiHeadAttention)	(None, 24, 1525)	6250997	['layer_normalization[0][0]', 'layer_normalization[0][0]']
dropout (Dropout)	(None, 24, 1525)	0	['multi_head_attention[0][0]']
tf.__operators__.add (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dropout[0][0]', 'input_1[0][0]']
layer_normalization_1 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add[0][0]']
dense (Dense)	(None, 24, 256)	390656	['layer_normalization_1[0][0]']
dropout_1 (Dropout)	(None, 24, 256)	0	['dense[0][0]']
dense_1 (Dense)	(None, 24, 1525)	391925	['dropout_1[0][0]']
tf.__operators__.add_1 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dense_1[0][0]', 'tf.__operators__.add[0][0]']
layer_normalization_2 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_1[0][0]']
multi_head_attention_1 (MultiHeadAttention)	(None, 24, 1525)	6250997	['layer_normalization_2[0][0]', 'layer_normalization_2[0][0]']
dropout_2 (Dropout)	(None, 24, 1525)	0	['multi_head_attention_1[0][0]']
tf.__operators__.add_2 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dropout_2[0][0]', 'tf.__operators__.add_1[0][0]']
layer_normalization_3 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_2[0][0]']
dense_2 (Dense)	(None, 24, 256)	390656	['layer_normalization_3[0][0]']
dropout_3 (Dropout)	(None, 24, 256)	0	['dense_2[0][0]']
dense_3 (Dense)	(None, 24, 1525)	391925	['dropout_3[0][0]']
tf.__operators__.add_3 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dense_3[0][0]', 'tf.__operators__.add_2[0][0]']
layer_normalization_4 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_3[0][0]']
multi_head_attention_2 (MultiHeadAttention)	(None, 24, 1525)	6250997	['layer_normalization_4[0][0]', 'layer_normalization_4[0][0]']
dropout_4 (Dropout)	(None, 24, 1525)	0	['multi_head_attention_2[0][0]']
tf.__operators__.add_4 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dropout_4[0][0]', 'tf.__operators__.add_3[0][0]']
layer_normalization_5 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_4[0][0]']
dense_4 (Dense)	(None, 24, 256)	390656	['layer_normalization_5[0][0]']
dropout_5 (Dropout)	(None, 24, 256)	0	['dense_4[0][0]']
dense_5 (Dense)	(None, 24, 1525)	391925	['dropout_5[0][0]']
tf.__operators__.add_5 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dense_5[0][0]', 'tf.__operators__.add_4[0][0]']
layer_normalization_6 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_5[0][0]']
multi_head_attention_3 (MultiHeadAttention)	(None, 24, 1525)	6250997	['layer_normalization_6[0][0]', 'layer_normalization_6[0][0]']
dropout_6 (Dropout)	(None, 24, 1525)	0	['multi_head_attention_3[0][0]']
tf.__operators__.add_6 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dropout_6[0][0]', 'tf.__operators__.add_5[0][0]']
layer_normalization_7 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_6[0][0]']
dense_6 (Dense)	(None, 24, 256)	390656	['layer_normalization_7[0][0]']
dropout_7 (Dropout)	(None, 24, 256)	0	['dense_6[0][0]']
dense_7 (Dense)	(None, 24, 1525)	391925	['dropout_7[0][0]']
tf.__operators__.add_7 (TFOpLambda)	(None, 24, 1525)	0	['dense_7[0][0]', 'tf.__operators__.add_6[0][0]']
layer_normalization_8 (LayerNormalization)	(None, 24, 1525)	3050	['tf.__operators__.add_7[0][0]']
global_average_pooling1d (GlobalAveragePooling1D)	(None, 1525)	0	['layer_normalization_8[0][0]']
dense_8 (Dense)	(None, 128)	195328	['global_average_pooling1d[0][0]']
dropout_8 (Dropout)	(None, 128)	0	['dense_8[0][0]']
dense_9 (Dense)	(None, 4575)	590175	['dropout_8[0][0]']
tf.reshape (TFOpLambda)	(None, 3, 1525)	0	['dense_9[0][0]']

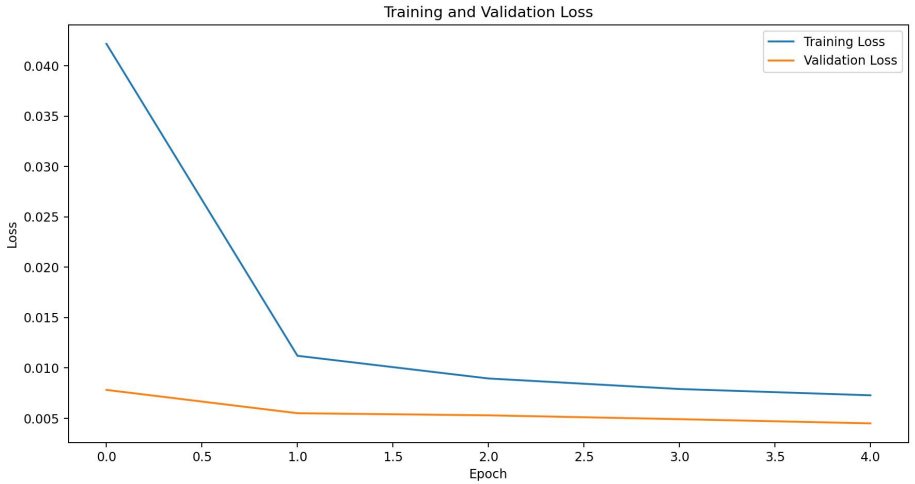
Total params: 28,947,265
Trainable params: 28,947,265
Non-trainable params: 0

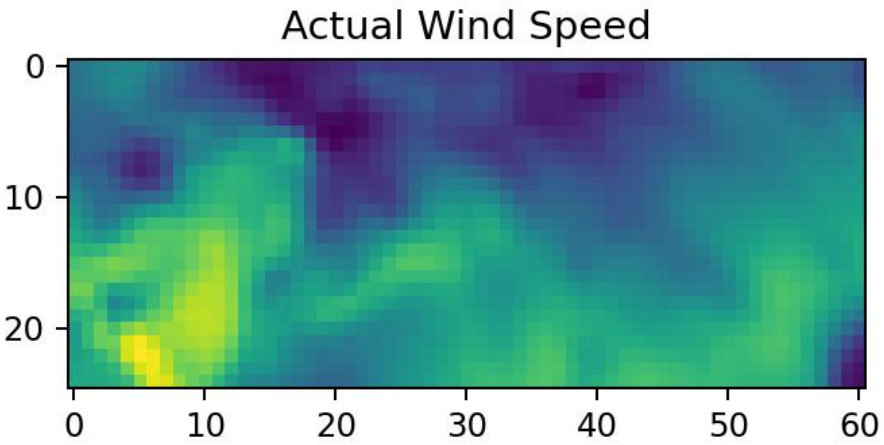
研究背景

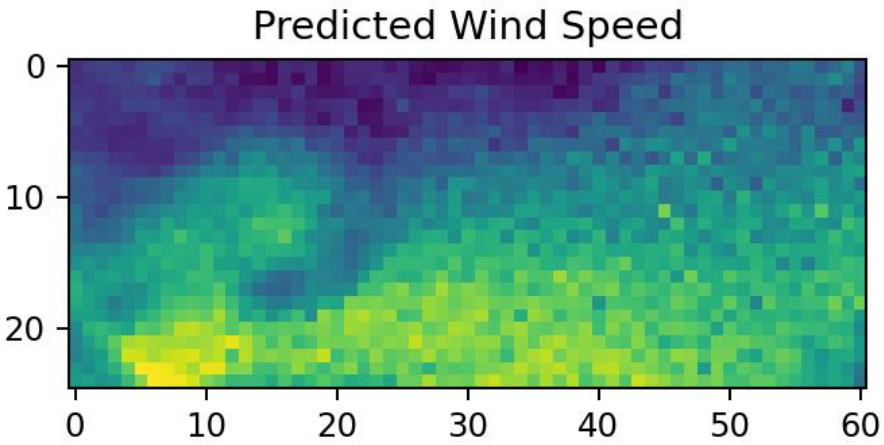
研究内容

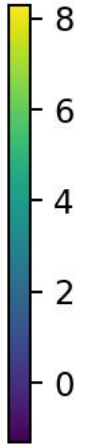
研究成果

单变量区域二维模型结果









输出第6个步长

研究背景

研究内容

研究成果

研究站点：阳江海上风电厂（模拟 **E112 N21**）

研究变量：地表10米风（U10、V10）、地表100米风（U100、V100）、平均波方向（mwd）、平均波周期（mwp）、显著波高（swh）

研究背景

研究内容

研究成果

多变量单站模型预测

构建**CNN+LSTM混合模型**。模型首先包含一个卷积层（Conv1D），用于在时间维度上提取特征。这里使用了64个滤波器，每个滤波器的窗口大小为3，激活函数为ReLU。然后通过池化层（MaxPooling1D）进行下采样，以减少特征数量。接着是两个LSTM层，在LSTM层之后使用了一个Dropout(0.2)层，以减少过拟合。最后是两个全连接层（Dense），其中第一个全连接层的激活函数为ReLU。

损失函数：均方误差（MSE）
优化器：Adam
评估指标：平均绝对误差（MAE）

变量：所有7个变量
数据量：[394464,7,25,61]（45年）
输入步长:输出步长 = 168:168
训练集:测试集:验证集 = 0.80:0.15:0.05
batch_size = 64; epochs = 1

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv1d_1 (Conv1D)	(None, 166, 64)	256
max_pooling1d_1 (MaxPooling 1D)	(None, 83, 64)	0
lstm_16 (LSTM)	(None, 83, 100)	66000
lstm_17 (LSTM)	(None, 100)	80400
dropout_8 (Dropout)	(None, 100)	0
dense_8 (Dense)	(None, 100)	10100
dense_9 (Dense)	(None, 168)	16968

Total params: 173,724
Trainable params: 173,724
Non-trainable params: 0

研究背景

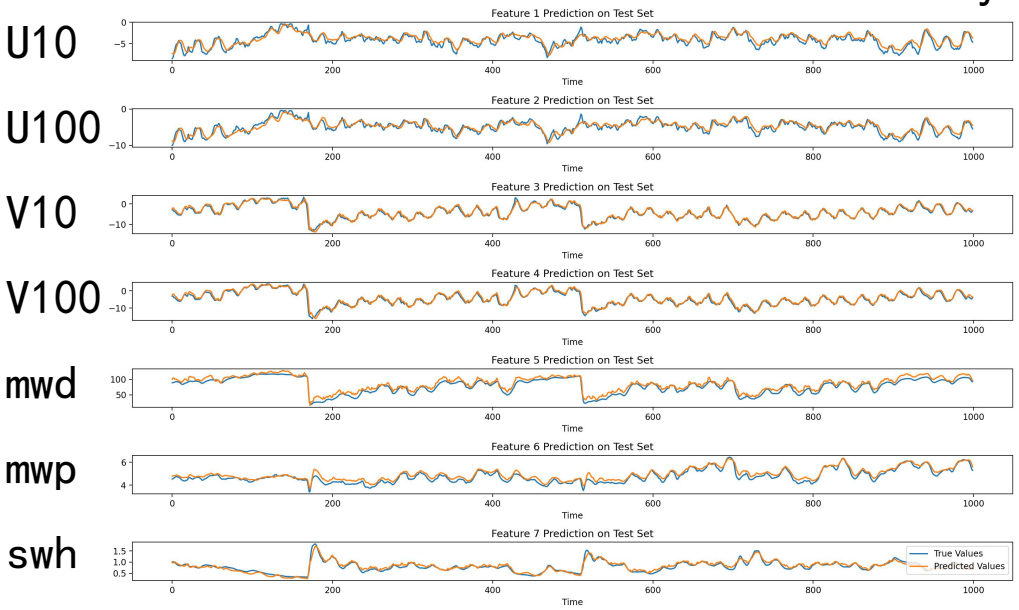
研究内容

研究成果

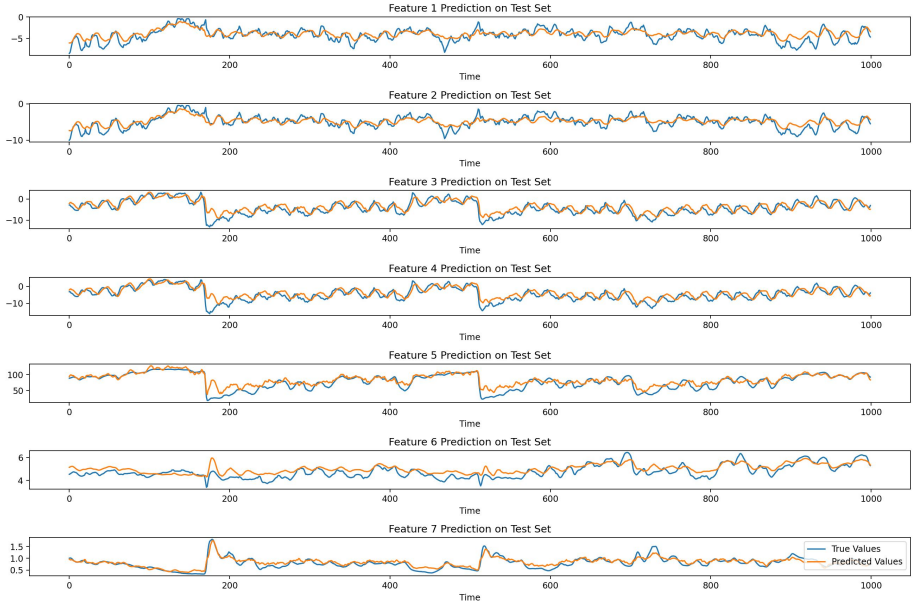
多变量单站模型模拟结果

随机取1000个验证集预测四个时间点变化的结果

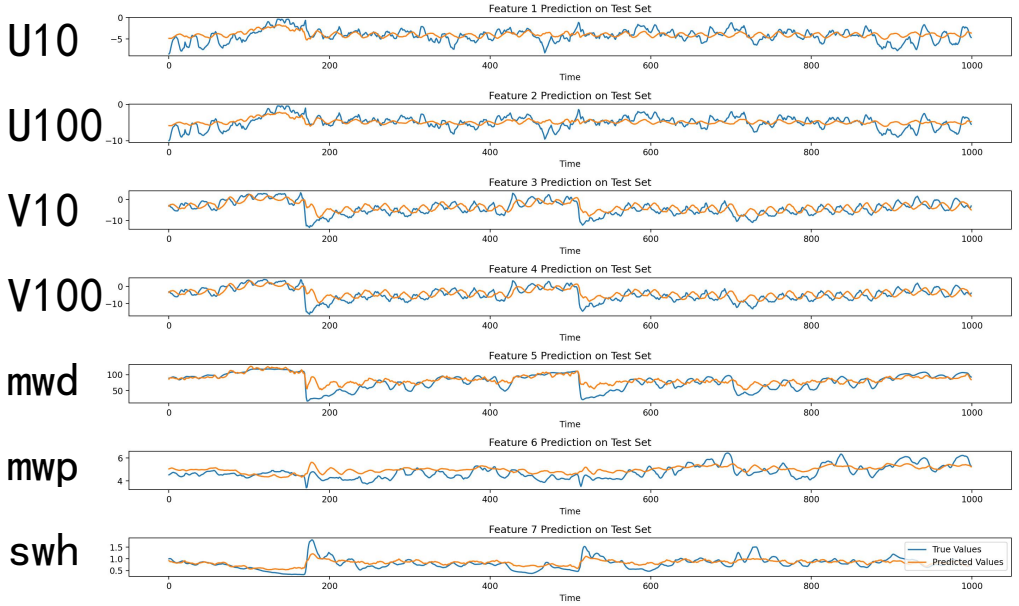
1day



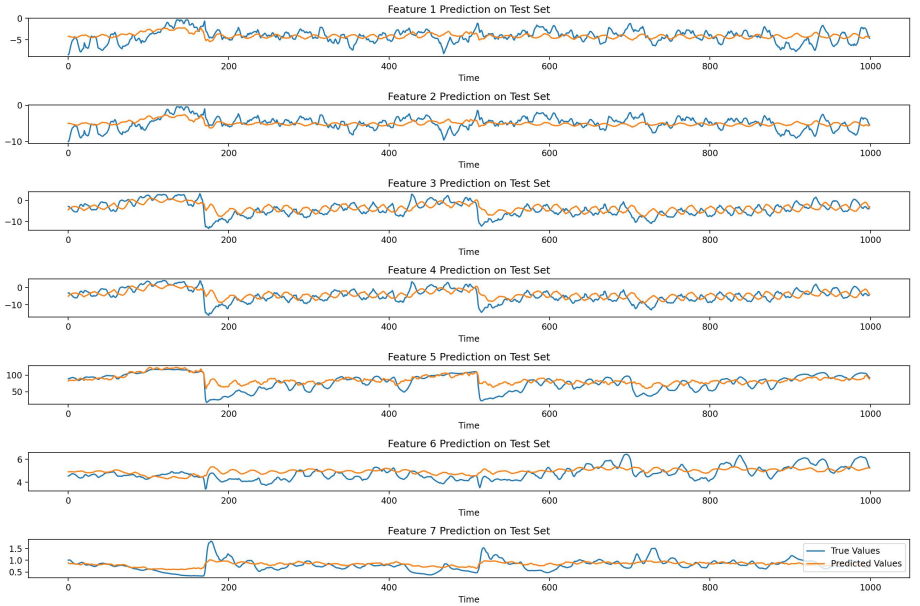
3day



5day



7day

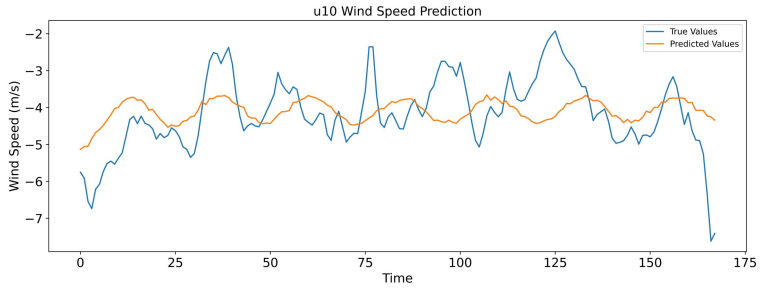


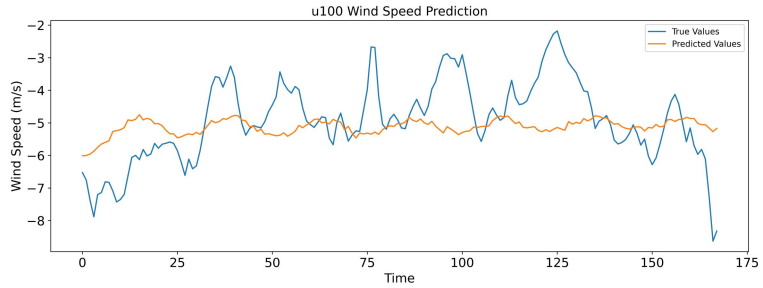
研究背景

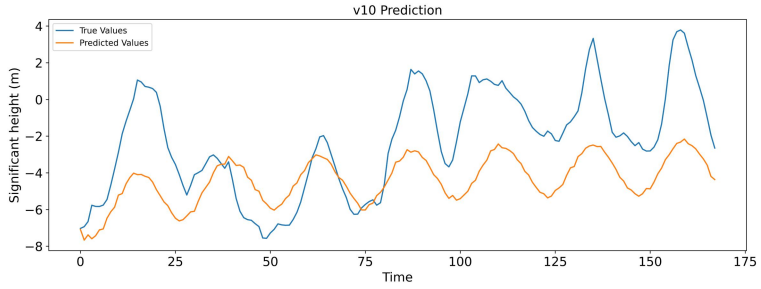
研究内容

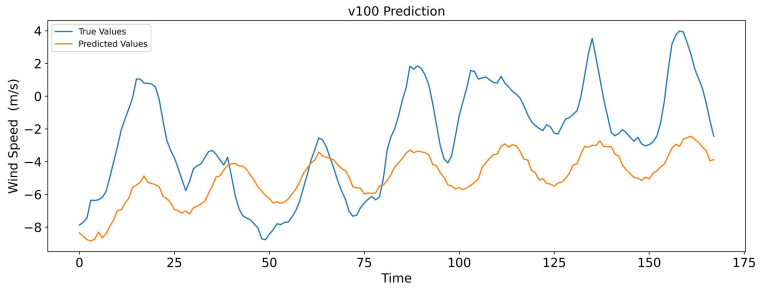
研究成果

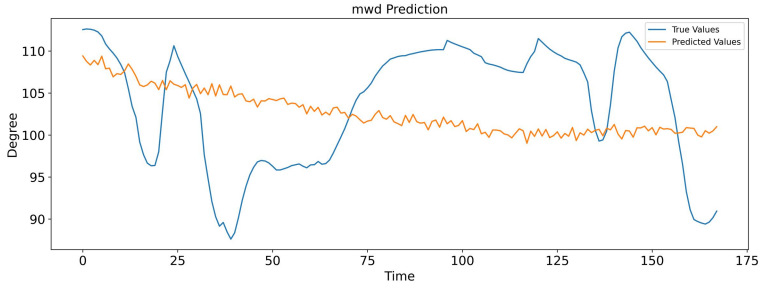
多变量单站模型模拟结果

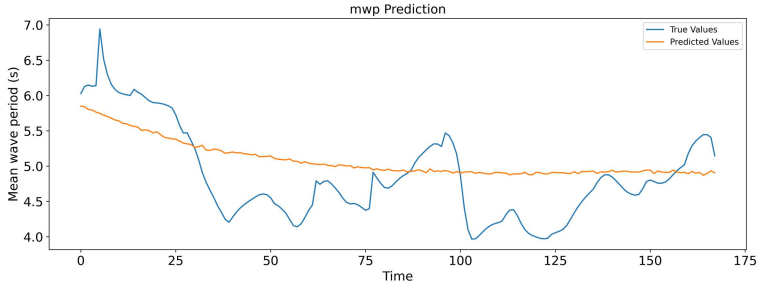




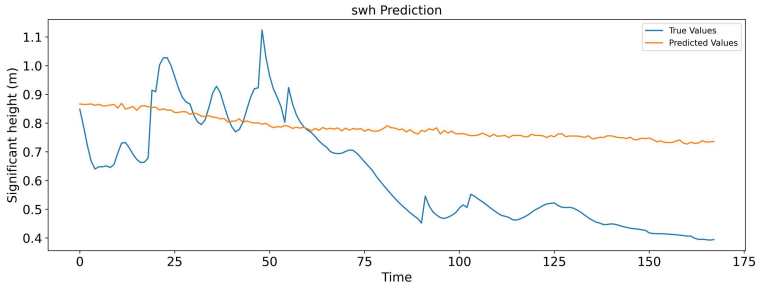








随机取一个验证集
预测168h变化结果

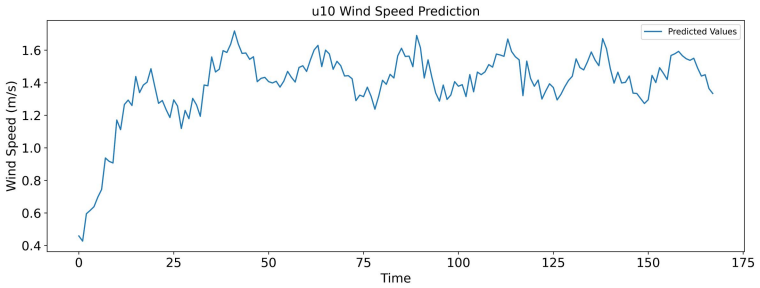


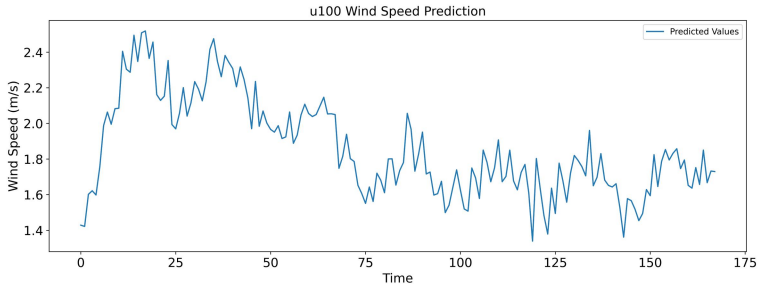
研究背景

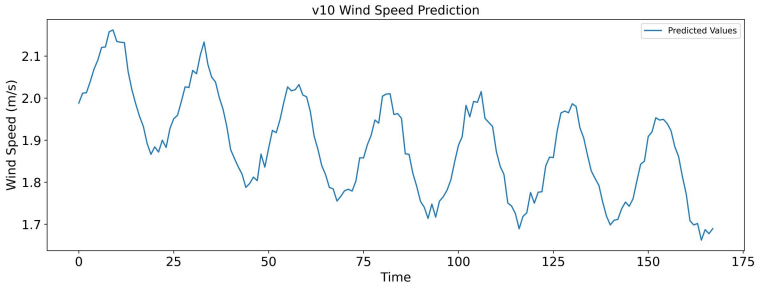
研究内容

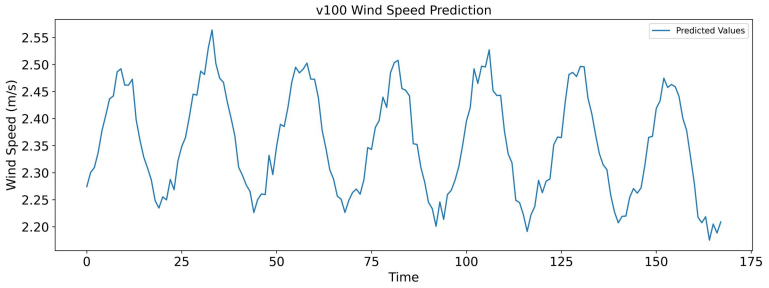
研究成果

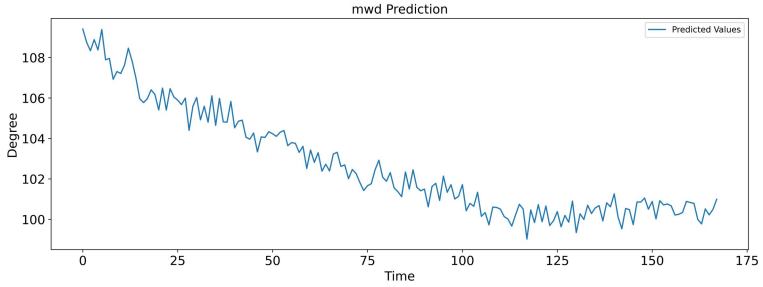
多变量单站模型预测结果

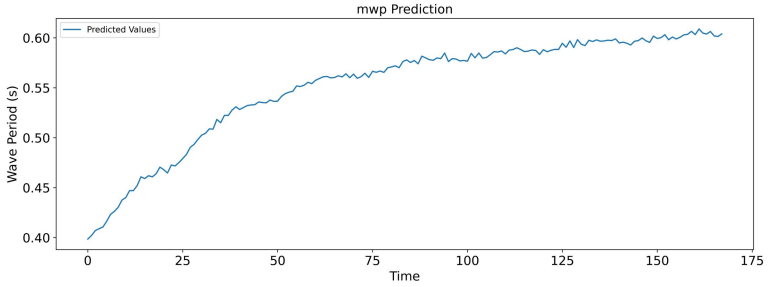




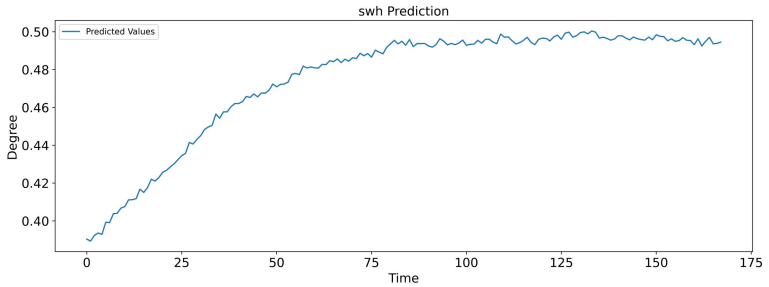








2024年6月8日至6月14日

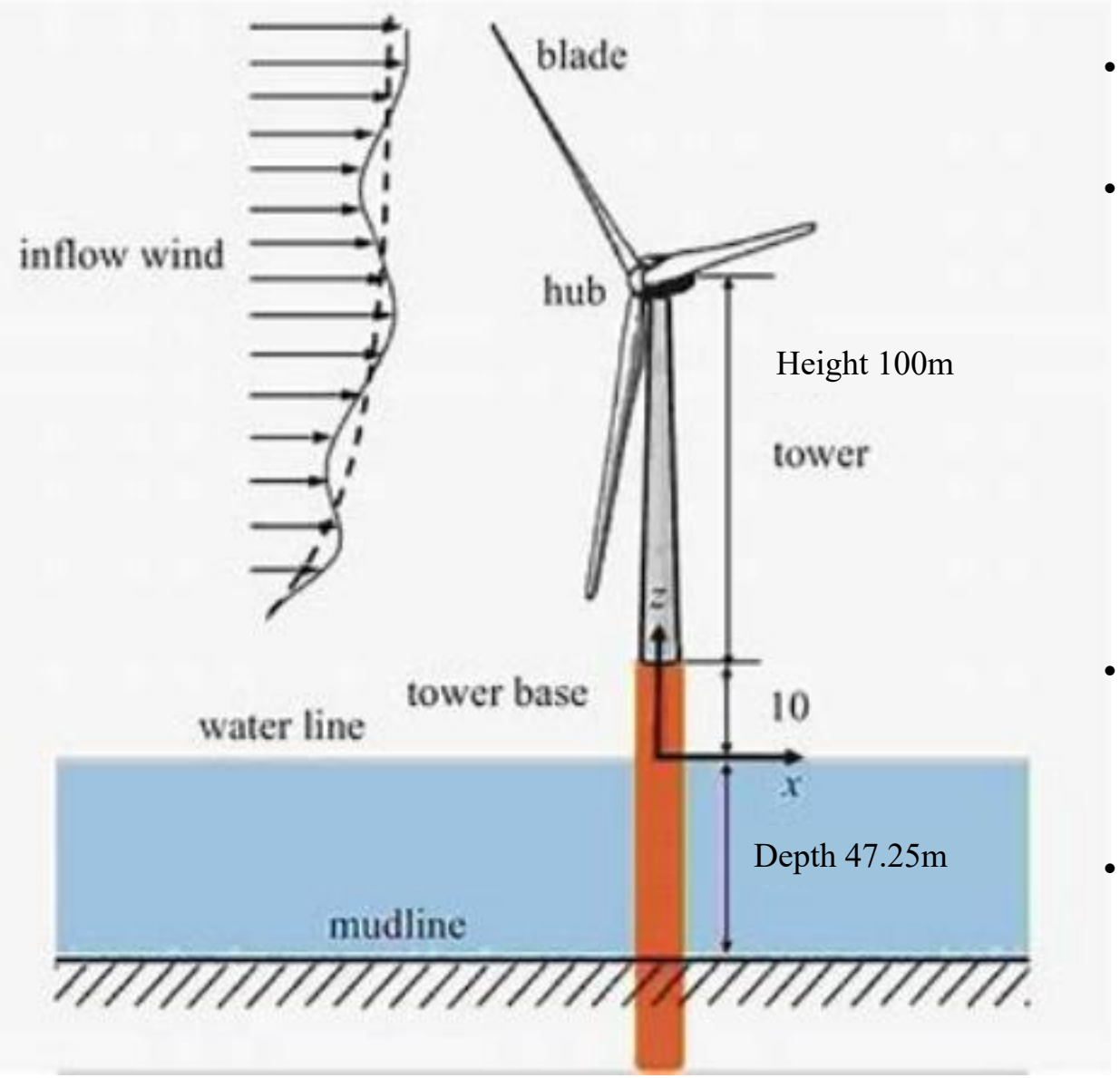


研究背景

研究内容

研究成果

物理模型抽象



海上风机模型工况简化图

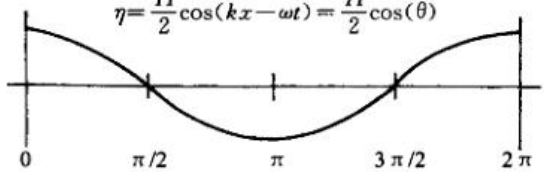
- **创建网格节点** np.linspace
  - 物理量 z_grid x_grid y_grid
- **提取气象数据**
  - **已知**节点数据
    Wind*4 10m和100m风速
    Wave*3 周期、波高、角度
    Current*2 10m流速
  - **未知**节点插值
    插值函数interp1d
    插值赋值节点
- **定义荷载计算函数**
  - 风和流的荷载 $F = 0.5\rho_{air}C_dAV^2$
  - 浪荷载计算 $F = 0.5\rho_{water}D\,u\,|u|C_d$
- **存储数据 DataFrame**
  - 循环建立DataFrame
  - 数据存储和呈现

研究背景

研究内容

研究成果

波浪荷载求解模型

相对深度	极浅水波 $d/L<1/25$ 或 $1/20$	浅水波 $1/20$ 或 $1/25<d/L<1/2$	深水波 $d/L>1/2$
波高轮廓	$\eta=\frac{H}{2}\cos(kx-\omega t)=\frac{H}{2}\cos(\theta)$  相位角（θ）		
波速	$C=\frac{L}{T}=\sqrt{gd}$	$C=\frac{gT}{2\pi}\tanh kd$	$C=C_0=\frac{L}{T}=\frac{gT}{2\pi}$
波长	$L=T\sqrt{gd}=CT$	$L=\frac{gT^2}{2\pi}\tanh kd$	$L=L_0=\frac{gT^2}{2\pi}C_0T$
波群速	$C_g=C\sqrt{gd}$	$C_g=nC=\frac{1}{2}\left[1+\frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right]C$	$C_g=\frac{C}{2}=\frac{gT}{4\pi}$
质点水平速度	$u=\frac{H}{2}\sqrt{\frac{g}{d}}\cos\theta$	$u=\frac{\pi H}{T}\frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd}\cos\theta$	$u=\frac{\pi H}{T}e^{kz}\cos\theta$
质点垂向速度	$w=\frac{\pi H}{T}\left(1+\frac{z}{d}\right)\sin\theta$	$w=\frac{\pi H}{T}\frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd}\sin\theta$	$w=\frac{\pi H}{T}e^{kz}\sin\theta$
质点水平加速度	$a_x=\frac{\pi H}{T}\left(\sqrt{\frac{g}{d}}\right)\sin\theta$	$a_x=\frac{2\pi^2 H}{T^2}\frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd}\sin\theta$	$a_x=2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2e^{kz}\sin\theta$
质点垂向加速度	$a_z=-\frac{2H\pi^2}{T^2}\left(1+\frac{z}{d}\right)\cos\theta$	$a_z=-\frac{2\pi^2 H}{T^2}\frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd}\cos\theta$	$a_z=-2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2e^{kz}\cos\theta$
质点水平位移	$\xi=-\frac{HT}{4\pi}\sqrt{\frac{g}{d}}\sin\theta$	$\xi=-\frac{H}{2}\frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd}\sin\theta$	$\xi=-\frac{H}{2}e^{kz}\sin\theta$
质点垂向位移	$\varepsilon=\frac{H}{2}\left(1+\frac{z}{d}\right)\cos\theta$	$\varepsilon=\frac{H}{2}\frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd}\cos\theta$	$\varepsilon=\frac{H}{2}e^{kz}\cos\theta$
压强	$p=\rho g(h-z)$	$p=-\rho gz+\frac{\rho gH}{2}\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}\cos\theta$	$p=\rho g\eta e^{kz}-\rho gz$

- 小尺度结构的波浪力计算
- Morrison 公式
- 将作用在细长柱体单位长度上的波浪力分解为

$$f=\frac{\rho D}{2}u\,|\,u\,|\,C_D+\rho\frac{\pi D^2}{4}\dot{u}C_M$$

- 水流速度来自波浪理论
- Cd和Cm称为阻力系数和附加水质量系数，来自工程经验

研究背景

研究内容

研究成果

荷载计算技术路线图

输入
结构和环境的基础信息
智能预测的气象数据

网格划分

纵向节点：1000 个 | 三维-二维抽象 z_grid

单元数据读取

已知节点数据：按index属性 | 未知节点：线性插值

各个单元荷载

分荷载计算原理 | 各单元荷载求解

耦合及可视化

u v方向矢量相加 | DataFrame

输出
荷载计算文件
可视化计算结果

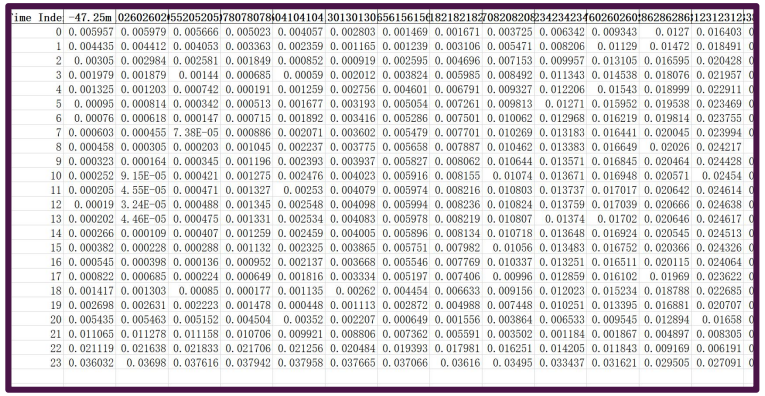
离散化

模型化

智能化

可视化

对应课程板块



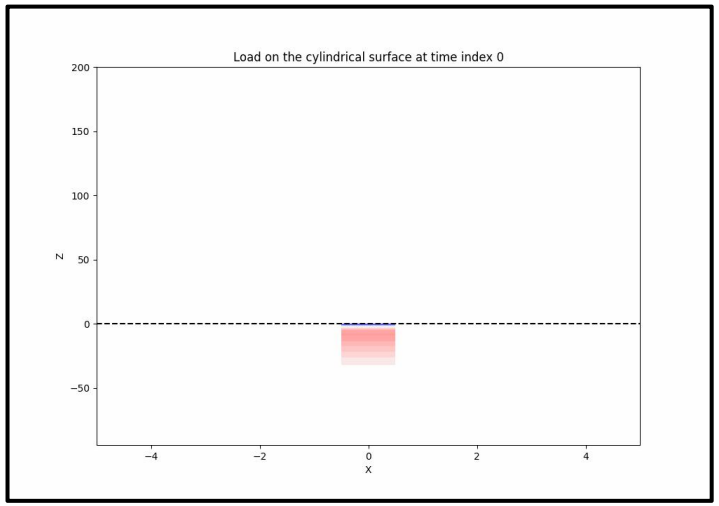
ime	Inde	-47.25m	02602602	55205205	78078078	04104104	30130130	56516516	82182182	70820820	34234234	60260260	86286286	12312312	3
	0	0.005957	0.005979	0.005666	0.005023	0.004057	0.002803	0.001469	0.001671	0.003725	0.006342	0.009343	0.0127	0.016403	0
	1	0.004435	0.004412	0.004053	0.003363	0.002359	0.001165	0.001239	0.003106	0.005471	0.008206	0.01129	0.01472	0.018491	0
	2	0.00305	0.002984	0.002581	0.001849	0.000852	0.000919	0.002595	0.004696	0.007153	0.009957	0.013105	0.016595	0.020428	0
	3	0.001979	0.001879	0.00144	0.000685	0.00059	0.002012	0.003824	0.005985	0.008492	0.011343	0.014538	0.018076	0.021957	0
	4	0.001325	0.001203	0.000742	0.000191	0.001259	0.002756	0.004601	0.006791	0.009327	0.012206	0.01543	0.018999	0.022911	0
	5	0.00095	0.000814	0.000342	0.000513	0.001677	0.003193	0.005054	0.007261	0.009813	0.01271	0.015952	0.019538	0.023469	0
	6	0.00076	0.000618	0.000147	0.000715	0.001892	0.003416	0.005286	0.007501	0.010062	0.012968	0.016219	0.019814	0.023755	0
	7	0.000603	0.000455	7.38E-05	0.000886	0.002071	0.003602	0.005479	0.007701	0.010269	0.013183	0.016441	0.020045	0.023994	0
	8	0.000458	0.000305	0.000203	0.001045	0.002237	0.003775	0.005658	0.007887	0.010462	0.013383	0.016649	0.02026	0.024217	
	9	0.000323	0.000164	0.000345	0.001196	0.002393	0.003937	0.005827	0.008062	0.010644	0.013571	0.016845	0.020464	0.024428	0
	10	0.000252	9.15E-05	0.000421	0.001275	0.002476	0.004023	0.005916	0.008155	0.01074	0.013671	0.016948	0.020571	0.02454	0
	11	0.000205	4.55E-05	0.000471	0.001327	0.00253	0.004079	0.005974	0.008216	0.010803	0.013737	0.017017	0.020642	0.024614	0
	12	0.00019	3.24E-05	0.000488	0.001345	0.002548	0.004098	0.005994	0.008236	0.010824	0.013759	0.017039	0.020666	0.024638	0
	13	0.000202	4.46E-05	0.000475	0.001331	0.002534	0.004083	0.005978	0.008219	0.010807	0.01374	0.01702	0.020646	0.024617	0
	14	0.000266	0.000109	0.000407	0.001259	0.002459	0.004005	0.005896	0.008134	0.010718	0.013648	0.016924	0.020545	0.024513	0
	15	0.000382	0.000228	0.000288	0.001132	0.002325	0.003865	0.005751	0.007982	0.01056	0.013483	0.016752	0.020366	0.024326	0
	16	0.000545	0.000398	0.000136	0.000952	0.002137	0.003668	0.005546	0.007769	0.010337	0.013251	0.016511	0.020115	0.024064	0
	17	0.000822	0.000685	0.000224	0.000649	0.001816	0.003334	0.005197	0.007406	0.00996	0.012859	0.016102	0.01969	0.023622	0
	18	0.001417	0.001303	0.00085	0.000177	0.001135	0.00262	0.004454	0.006633	0.009156	0.012023	0.015234	0.018788	0.022685	0
	19	0.002698	0.002631	0.002223	0.001478	0.000448	0.001113	0.002872	0.004988	0.007448	0.010251	0.013395	0.016881	0.020707	0
	20	0.005435	0.005463	0.005152	0.004504	0.00352	0.002207	0.000649	0.001556	0.003864	0.006533	0.009545	0.012894	0.01658	0
	21	0.011065	0.011278	0.011158	0.010706	0.009921	0.008806	0.007362	0.005591	0.003502	0.001184	0.001867	0.004897	0.008305	0
	22	0.021119	0.021638	0.021833	0.021706	0.021256	0.020484	0.019393	0.017981	0.016251	0.014205	0.011843	0.009169	0.006191	0
	23	0.036032	0.0369	0.037616	0.037942	0.037958	0.037665	0.037066	0.03616	0.03495	0.033437	0.031621	0.029505	0.027091	0

清華大學
Tsinghua University

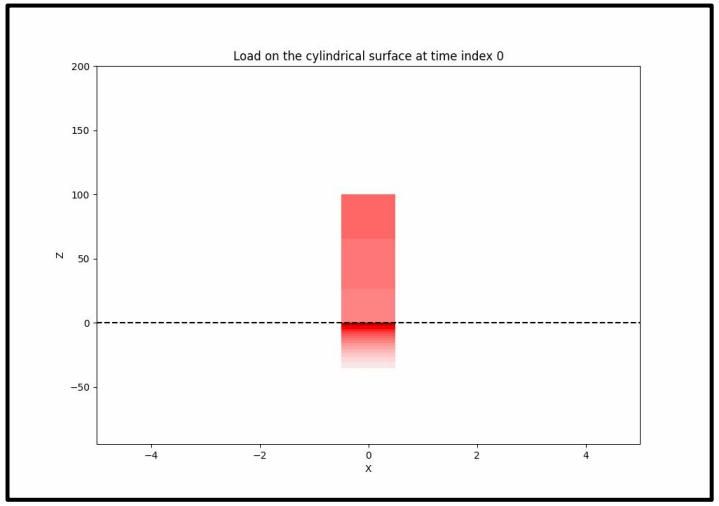
03 研究成果

Research Result

荷载计算结果展示

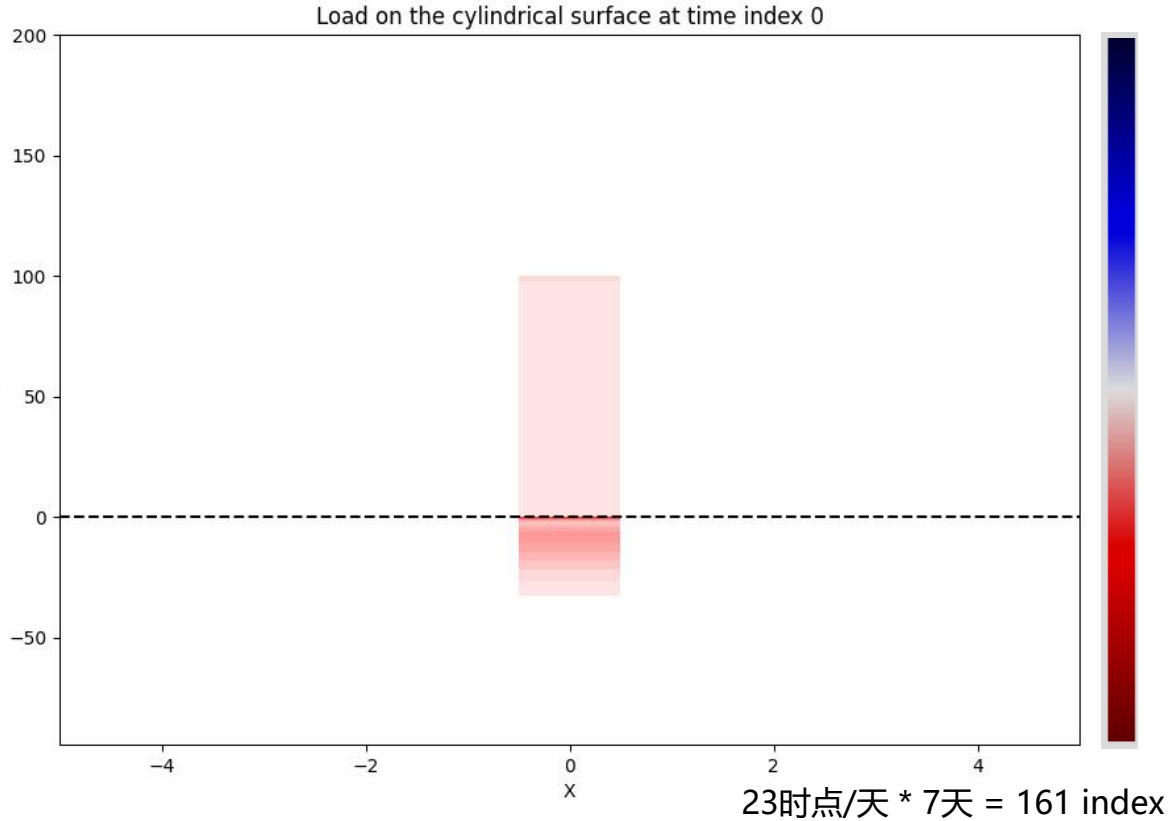


风浪流在u方向的分布耦合力(N/m)



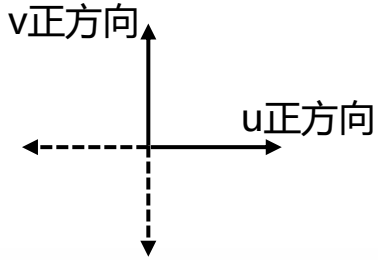
风浪流在v方向的分布耦合力(N/m)

矢量相加



23时点/天 * 7天 = 161 index

风浪流沿柱高的分布耦合力(N/m)



清華大學
Tsinghua University

谢谢聆听～

名字	分工情况
冯伟杰	各类气象的变量预测
郭金霄	海洋风机的荷载求解

2024.06.14 | 冯伟杰 郭金霄