



国家电网  
STATE GRID

中国电力科学研究院  
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

## 基于机器学习的风电功率预测

裴岩, 博士



MATLAB EXPO 2021

# 碳达峰、碳中和

## A path to carbon neutrality

什么是‘碳达峰，碳中和’

- 2030年
  - 碳排放达到峰值
- 2060年
  - 实现碳中和
- 什么是碳中和
  - 以节能减排、植树造林等方式，抵消自身产生的二氧化碳排放，实现二氧化碳‘零排放’
  - 碳中和是实现绿色发展的‘必选项’



# 碳达峰、碳中和

## A path to carbon neutrality

如何达到碳中和？政策、工业结构、能源结构...

- 构建以新能源为主体的新一代电力系统
  - 大规模新能源发电可靠接入电网
  - 满足电力系统供需平衡



| Year | RE capacity | Capacity percentage | Generation percentage |
|------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 2025 | 860GW       | 28-35%              | 15-17%                |
| 2030 | 1380GW      | 40-50%              | 22-28%                |
| 2060 | 5000GW      | 55-65%              | 55-60%                |

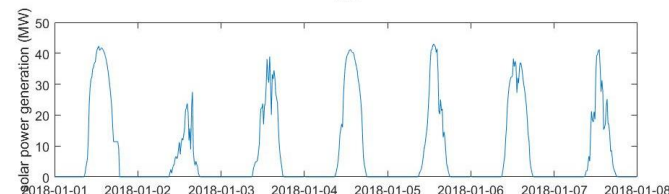
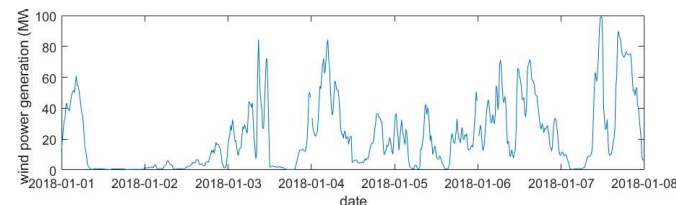
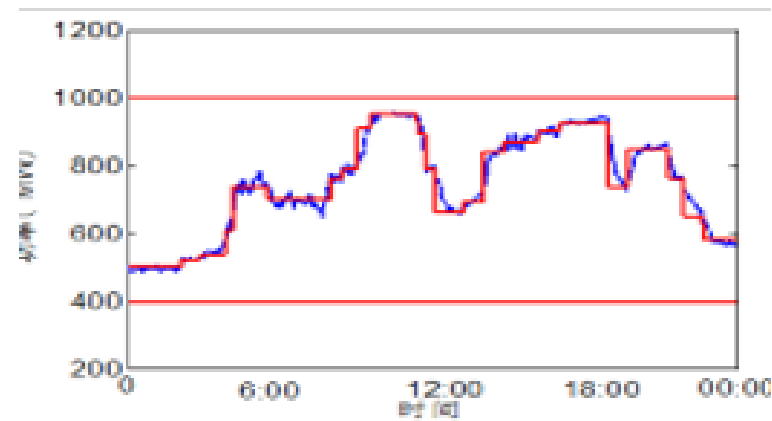
- Estimation for the region covered by the State Grid

# 常规能源和可再生能源发电特性

## Features of traditional generation and renewable generation

### 可控性 & 波动性

- 可控性
  - 常规能源发电具有可控性
  - 新能源发电不可控
- 波动性
  - 常规能源发电可以提供确定性的发电曲线
  - 新能源发电具有强烈的波动性

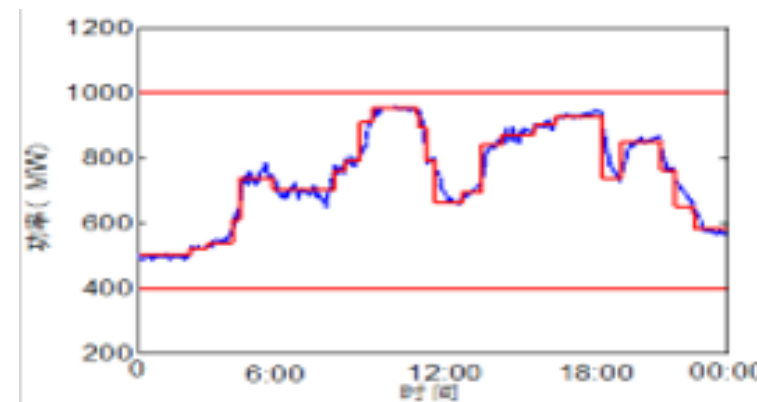
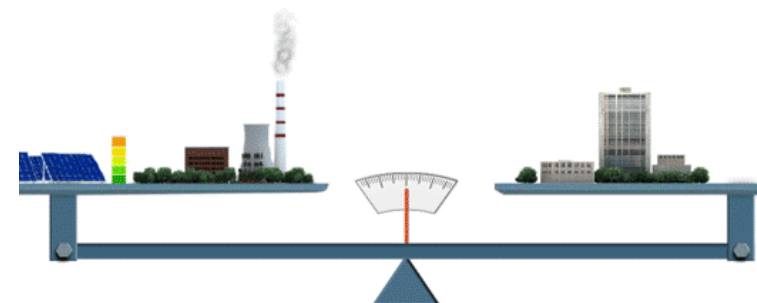


# 电网平衡面临的挑战

## Power system balance challenge

新能源接入电网的不同场景:

- 电网实时平衡
  - 提前预测未来负荷曲线
  - 根据负荷预测结果安排发电单元并实时跟踪
- 极少量新能源接入
  - 根据负荷预测结果提前制定常规能源开机计划
  - 通过控制常规能源即可实现电力系统平衡

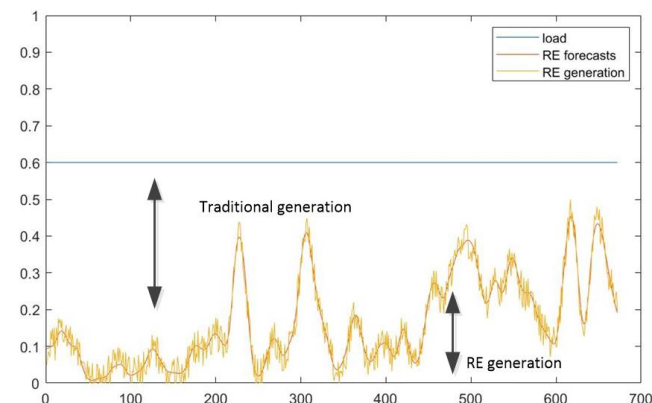
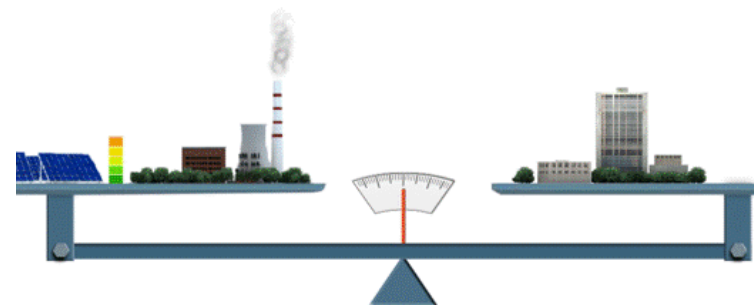


# 电网平衡面临的挑战

## Power system balance challenge

新能源接入电网的不同场景:

- 电网实时平衡
  - 提前预测未来负荷曲线
  - 根据负荷预测结果安排发电单元并实时跟踪
- 大规模新能源接入
  - 需根据负荷预测和新能源预测结果提前制定开机计划
  - 新能源预测的不确定性给电力系统带来不确定性

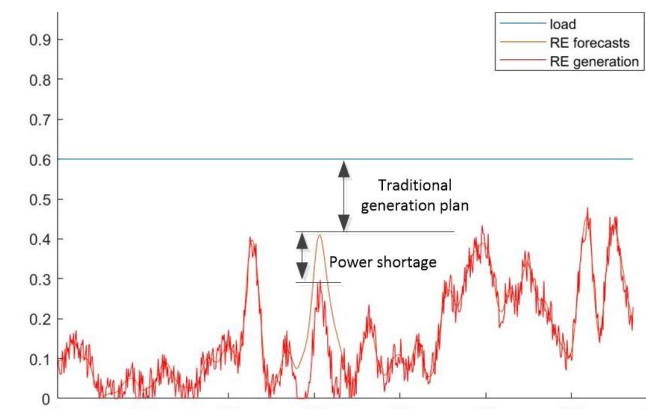
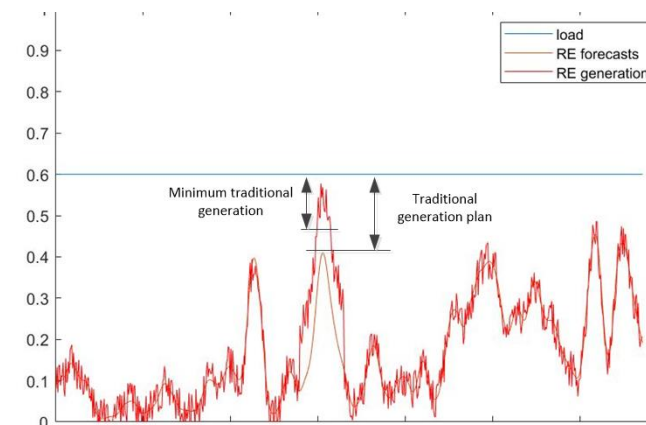


# 电网平衡面临的挑战

## Power system balance challenge

大规模新能源接入带来的不确定性:

- 新能源预测小于新能源实际发电
  - 新能源限电
  - 新能源电站经济利益受损
  - 影响新能源的消纳
- 新能源预测大于新能源实际发电
  - 电力供应不足，切负荷
  - 影响电网安全



# 短期风电功率预测

Short term wind power forecasting - Predict wind power generation of next several days

## 数值天气预报NWP

- 对数值天气预报的要求
  - 空间尺度
  - 时间尺度
- 中国电力科学研究院数值天气预报中心
  - 覆盖全国
  - 空间分辨率3\*3 km
  - 预测时长240h
  - 时间分辨率15min



# 短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

对于单个风电场的功率预测

### 特征选择

- 数值天气预报特征
  - 超过100个NWP特征
  - 风速、风向、辐照度、湿度、温度、气压等
- 特征选择
  - 基于专家经验的特征初选：特定层高风速、风向、湿度、大气压等
  - SFS: 选择预测性能最佳且个数最少的NWP特征子集

```
20 - potentialFeatures = [3 6 20 7 8 9 10 25 31 34]';
21 - xt = normedDataTrain(:, potentialFeatures);
22 - yt = normedDataTrain(:, end);
23 - xval = normedDataTest(:, potentialFeatures);
24 - yval = normedDataTest(:, end);
25 - c = cvpartition(yt, 'k', 5);
26 - opts = statset('UseParallel', true, 'Display', 'iter');
27 - [fs, history] = sequentialfs(@selectFeatures, xt, yt, ...
28 -                             'cv', c, ...
29 -                             'options', opts, ...
30 -                             'nfeatures', 5, ...
31 -                             'keepin', [4 9 10]);
32 - end
33 - %% SFS function
34 - function evalcriterion = selectFeatures(xt, yt, xval, yval)
35 -
```

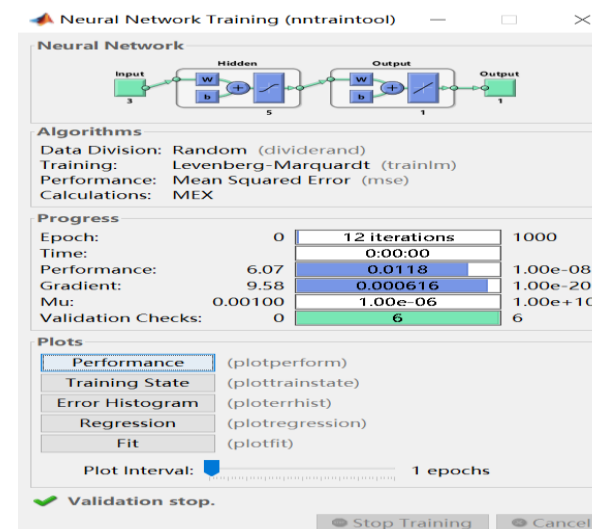
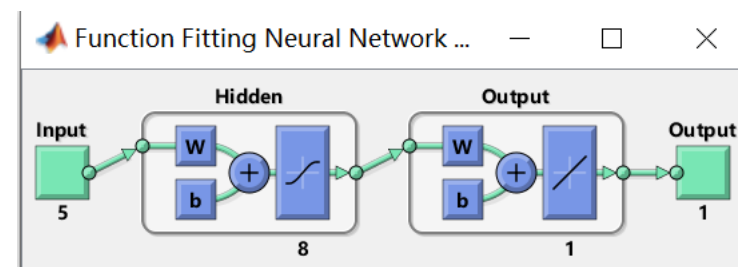
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

对于单个风电场的功率预测

预测模型搭建及训练

- 什么是工程应用中最好的模型
  - 可以解决工程实际问题
  - 简单、标准、便于部署
  - 选择MLP作为单场站预测模型
- MLP 结构优选和训练
  - 基于交叉验证策略选择最优结构
  - 使用MATLAB构建和训练预测模型

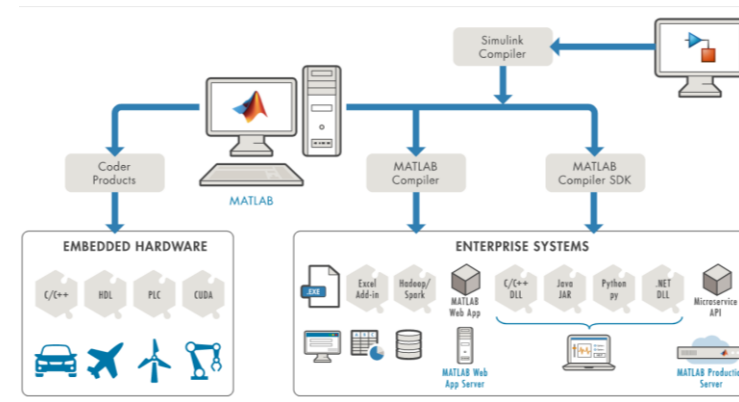
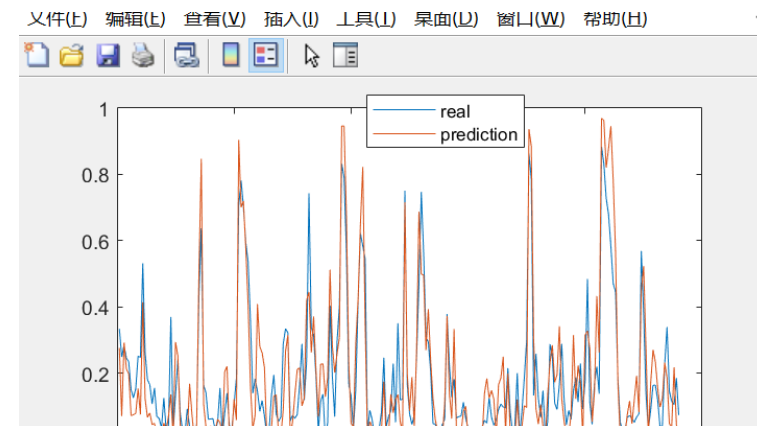


# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对单个风电场的功率预测  
结果和部署

- 预测性能
  - 每日08:00前发布日前预测结果
  - 月平均 nRMSE < 0.13
- 产品部署
  - 在Java应用中调用训练好的模型



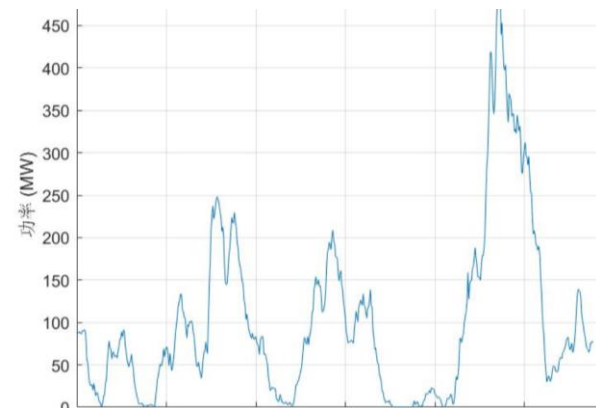
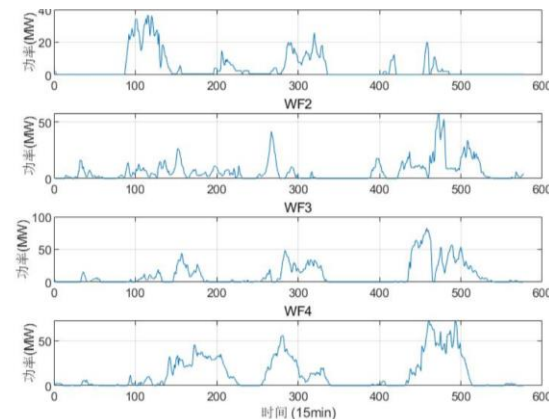
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

为什么要预测一个区域的风电功率?

- Prediction of single farms is useful for wind farm owners
  - 强制性标准要求
  - 电力市场交易
- Prediction of a region is useful for dispatchers
  - 提前制定开机计划
  - 支撑电力系统平衡与安全



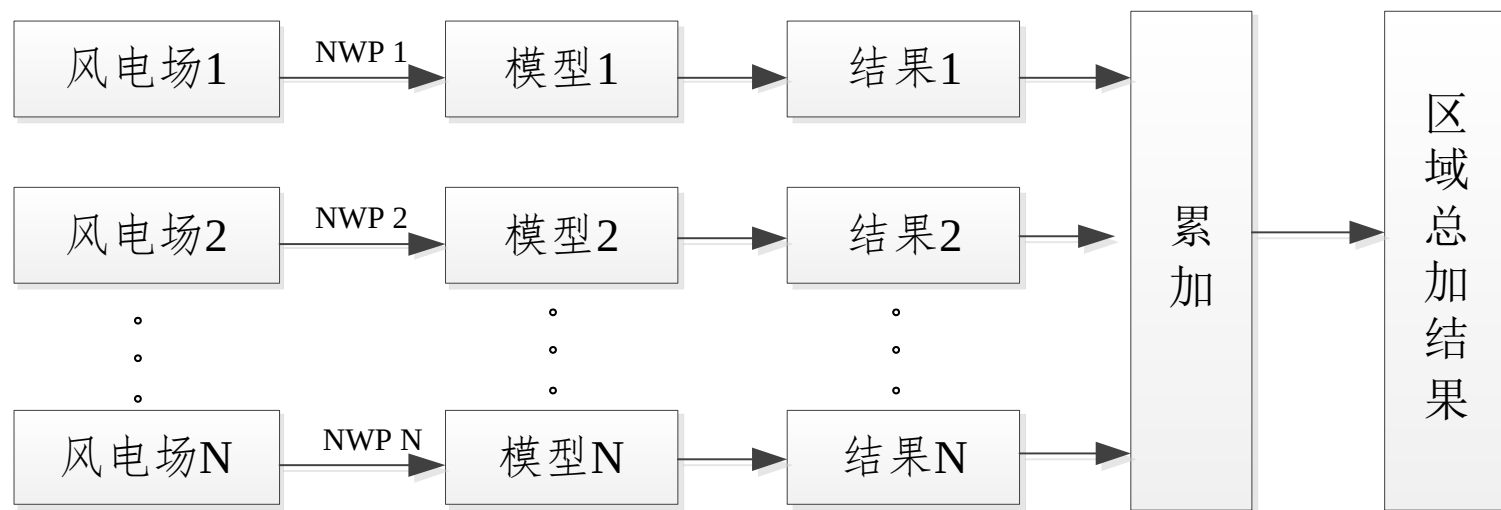
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? 一种简单策略.

- 单个风电场预测结果相加
  - 针对每个风电场训练一个预测模型
  - 对所有风电场预测结果进行累加得到区域总加预测结果



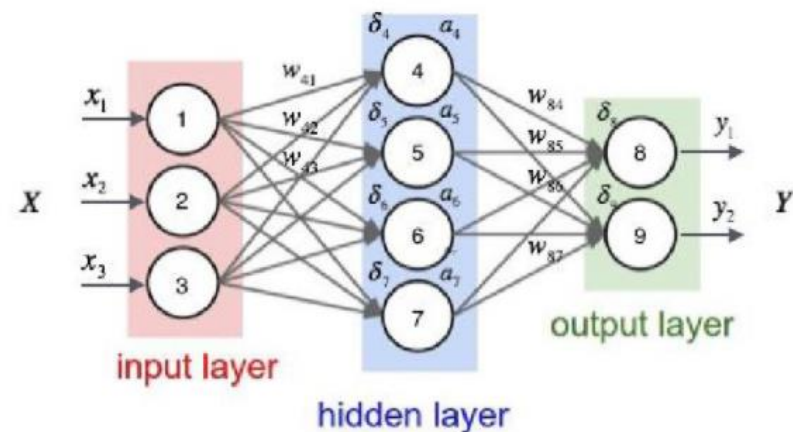
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? 一种简单策略.

- 优势
  - 简单
  - 结构清晰
  - 每个模型均可快速部署
- 缺点
  - 每个区域需部署和维护多个模型
  - 每个风电场的预测结果基于单点的NWP
  - 未考虑气象的区域关联特征



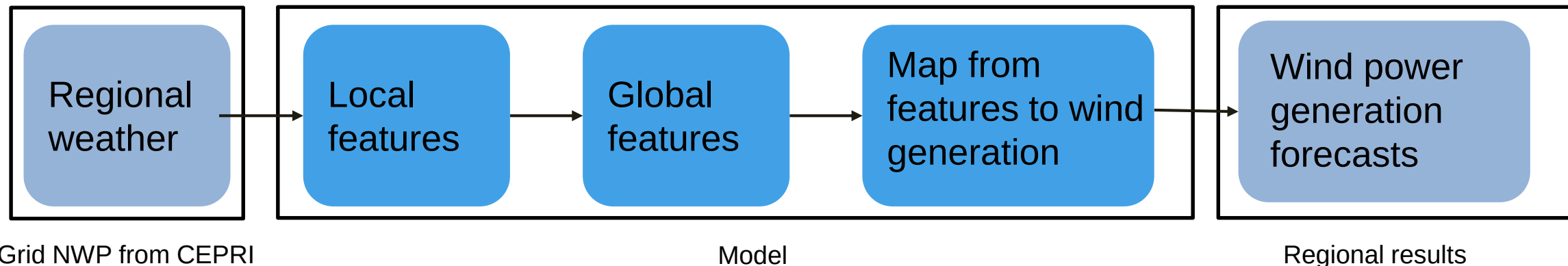
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率？目标

- 一个区域一个模型
  - 针对一个区域构建可以直接预测区域总加功率的单个模型
- 区域气象特征
  - 模型可提取区域气象中的局部和全局特征
- 可移植性
  - 模型可快速移植到其他区域或者其他应用场景



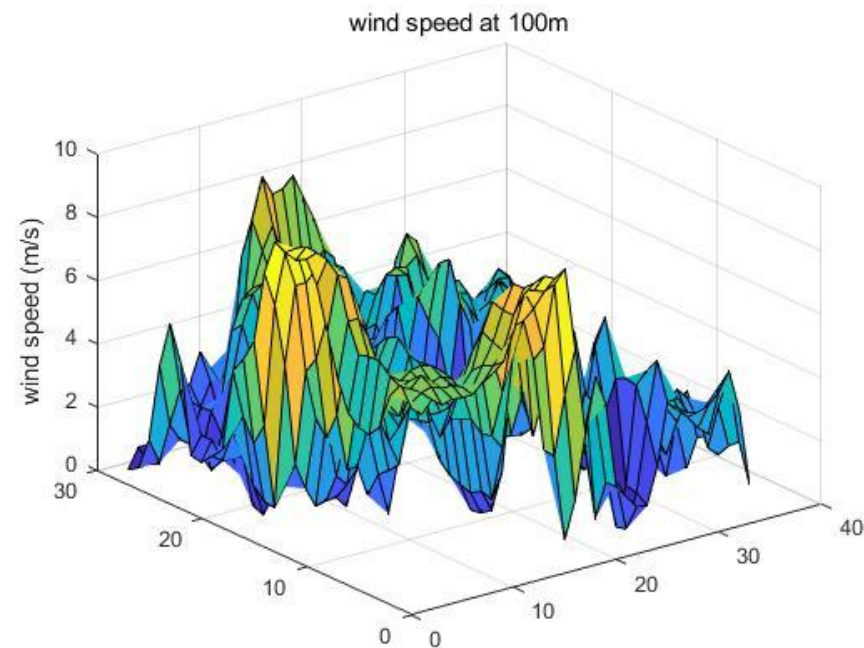
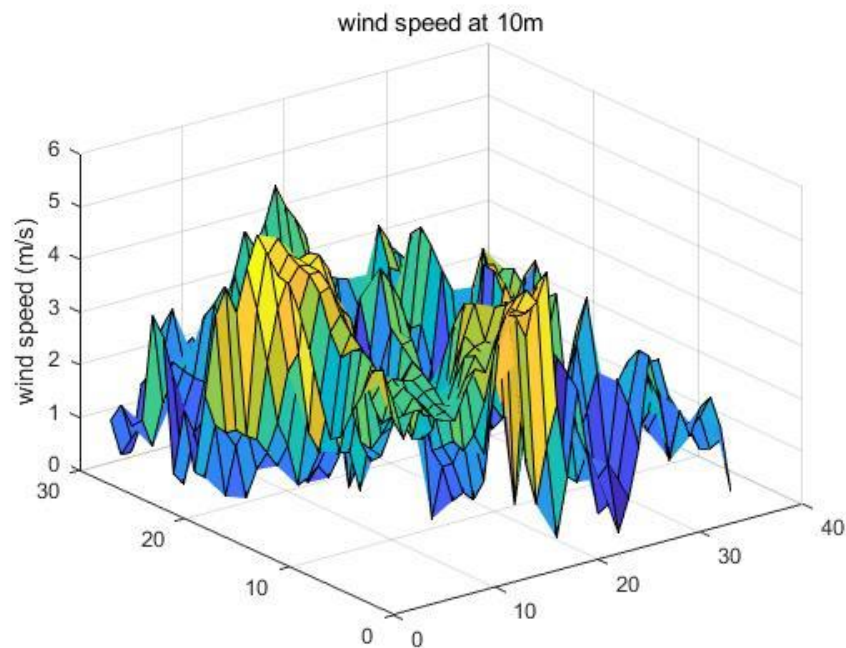
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? CEPRI网格数值天气预报.

- 区域天气具有局域和全局特征



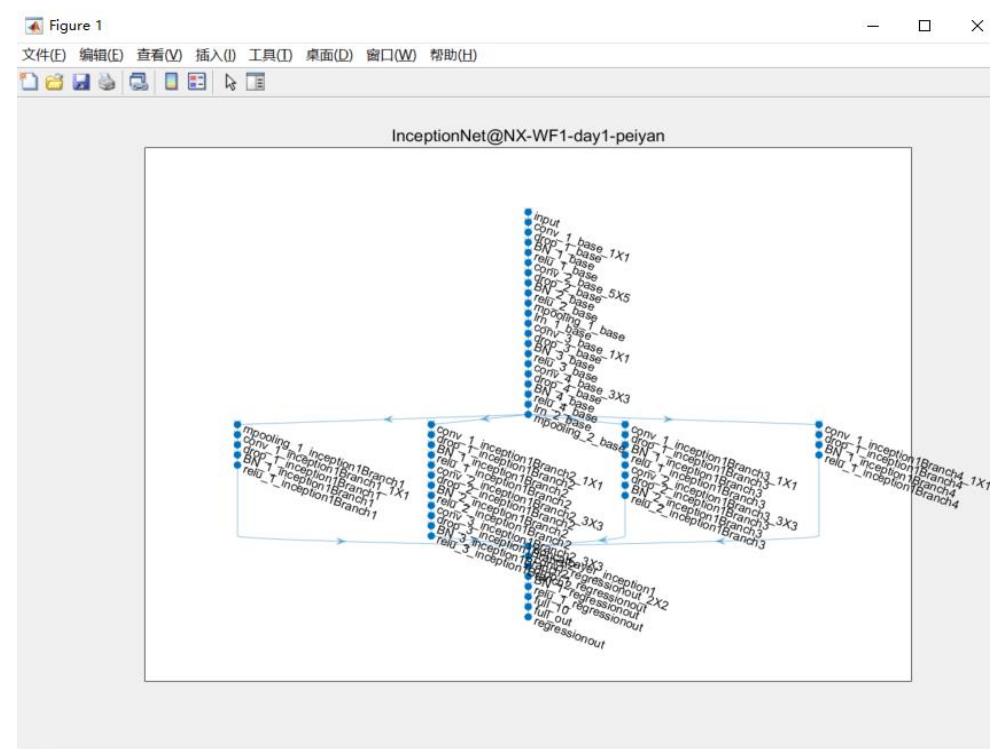
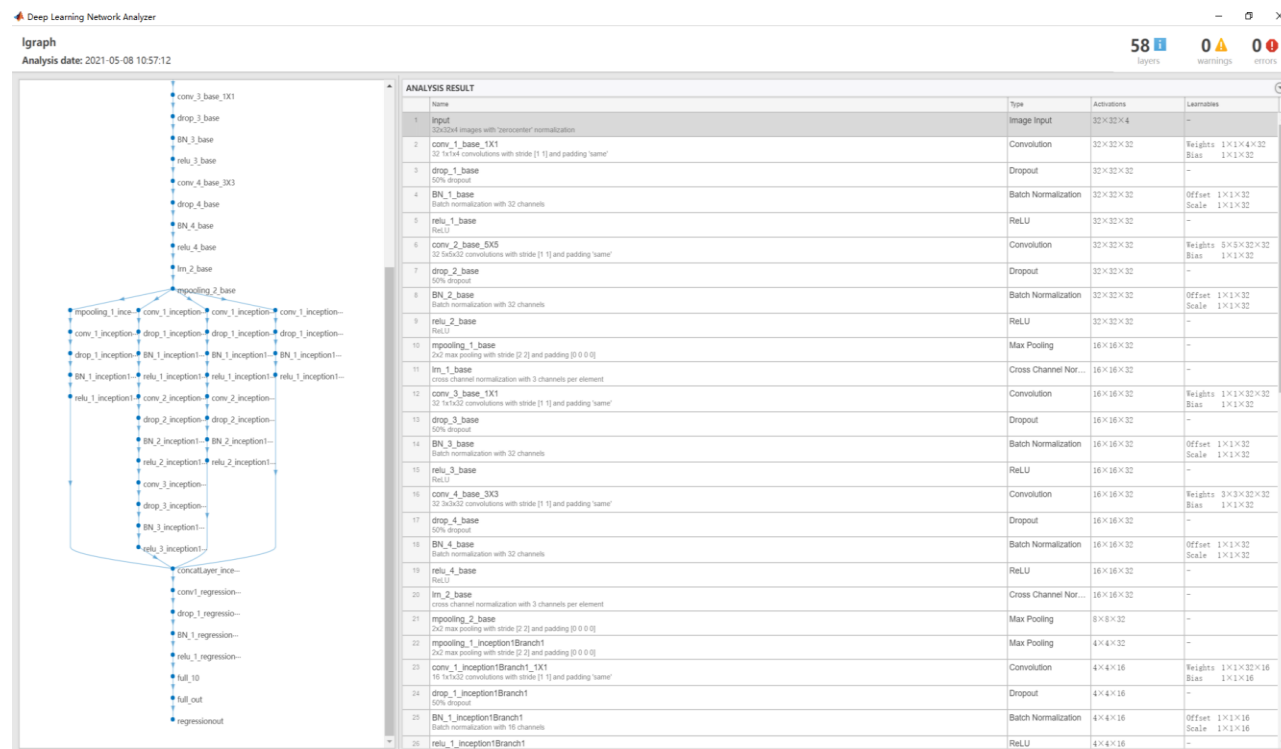
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? CNN 示例模型.

- InceptionNet-InputSize: 32X32X4



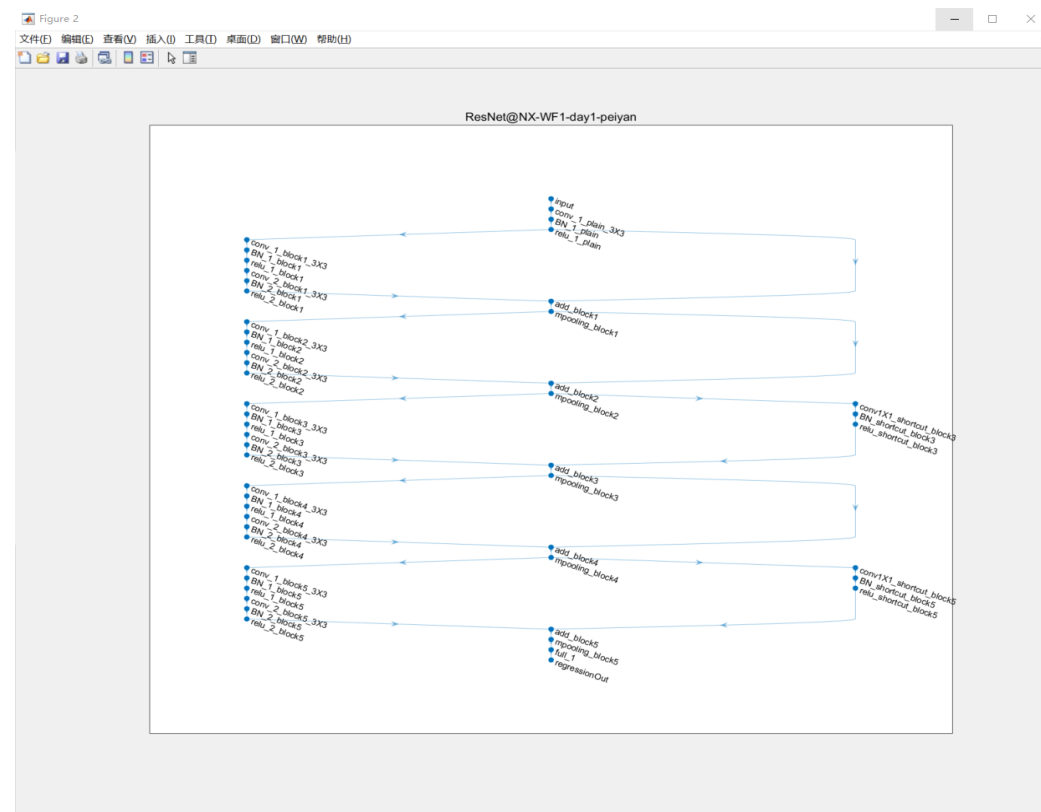
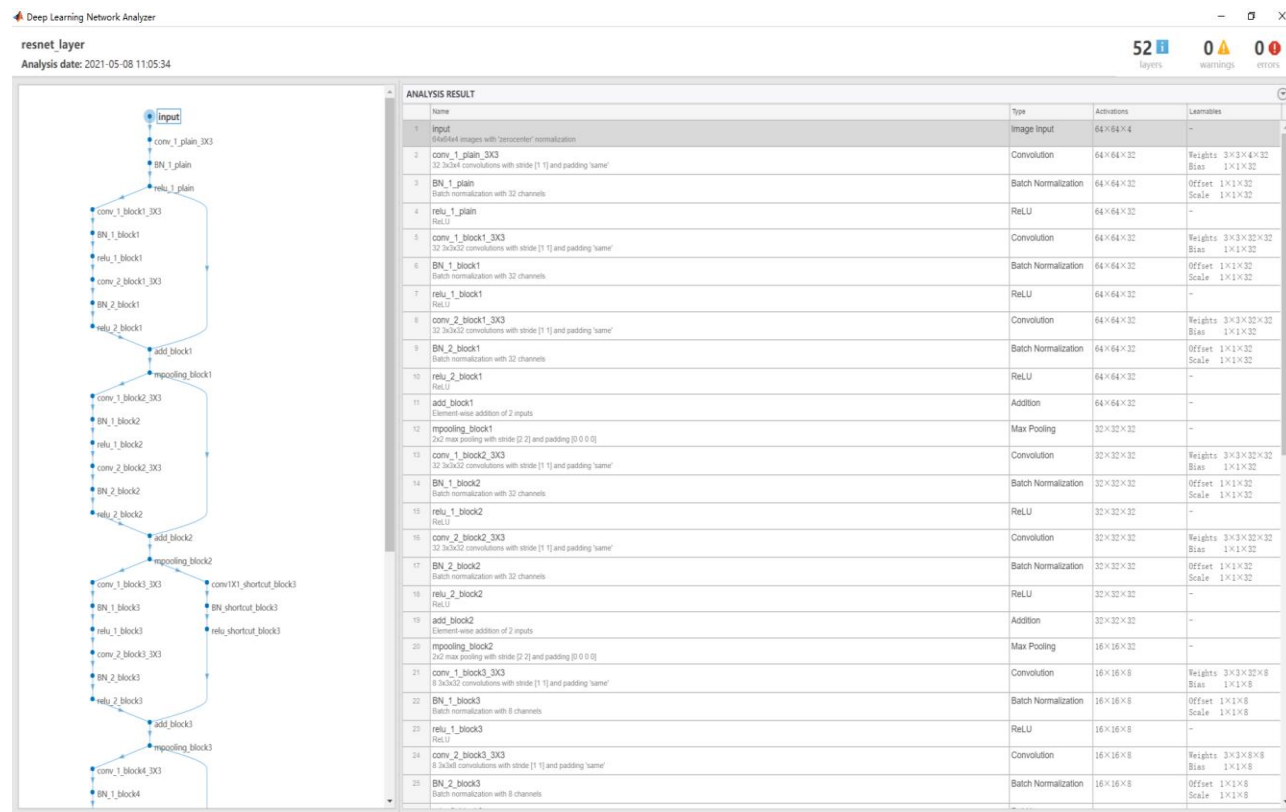
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? CNN 示例模型.

- ResNet-InputSize : 64X64X4



# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? CNN模型开发.

- MATLAB支持通过matlab代码和图形式设计两种方式
- CEPRI基于MATLAB开发了CNN模型自动搭建工具，用于模型自动搭建和结构评估

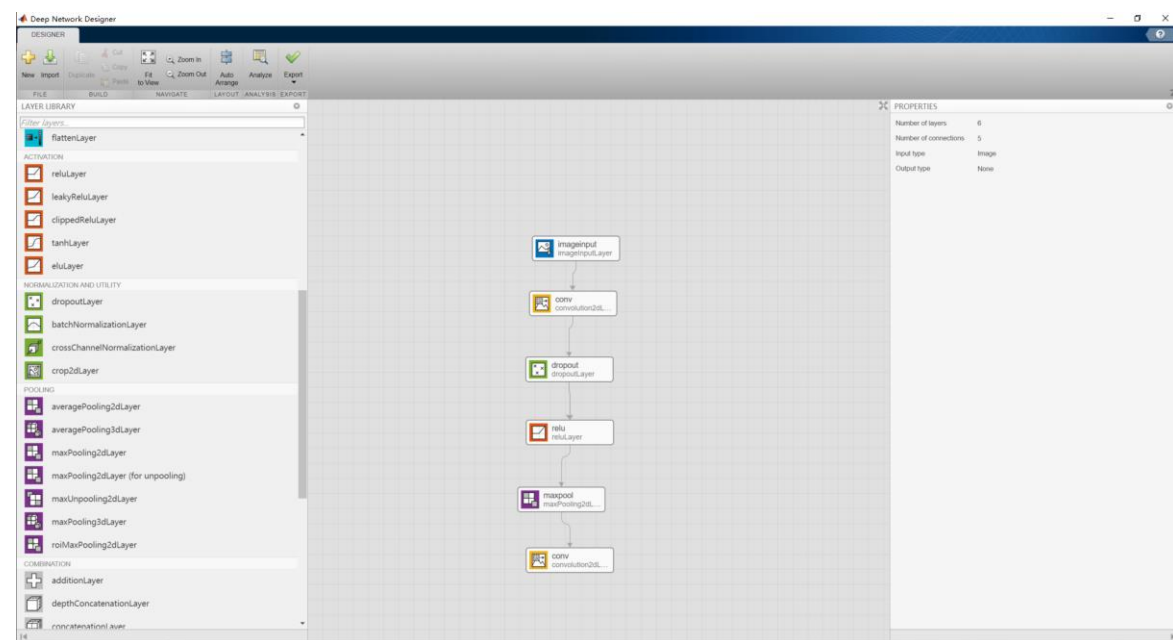
```
function tmpLayer = wpCreatResNet(inputSize)
%%
% inputSize = [32 32 4];

%% input layer
layers_input = [imageInputLayer(inputSize, 'Name', 'input')];
%% plain convolutional layer
conv1 = [
    convolution2dLayer(3, 64, 'Padding', 'same', 'Stride', 1, 'Name', 'conv_1_plain_3X3')
    batchNormalizationLayer('Name', 'BN_1_plain')
    reluLayer('Name', 'relu_1_plain')
];

%% resnet block1 downsize /2
resblock = wpCreateResBlock(layers_input, filtersize, activationDepth, stridelen, blockid)
resblock1 = wpCreateResBlock(conv1, 3, 32, 1, 1);
downlayer1 = [
    maxPooling2dLayer(2, 'Stride', 2, 'Name', 'mpooling_1_block1')
];

%% block2 downsize /2
tmpLayer = addLayers(resblock1, downlayer1);
layerNames = {tmpLayer.Layers(:).Name}';
addlayerid = find(cellfun(@(x) strcmp(x(1:3), 'add'), layerNames) == 1);
lastaddlayerid = addlayerid(end);
tmpLayer = connectLayers(tmpLayer, tmpLayer.Layers(lastaddlayerid).Name, downlayer1.Name);
resblock2 = wpCreateResBlock(tmpLayer, 3, 16, 1, 2);
clear tmpLayer resblock1 downlayer1;
downlayer2 = [
    maxPooling2dLayer(2, 'Stride', 2, 'Name', 'mpooling_1_block2')
];

%% block3 downsize /2
```



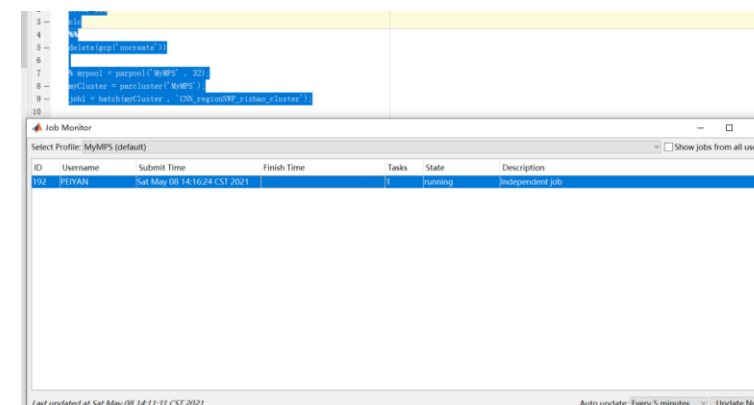
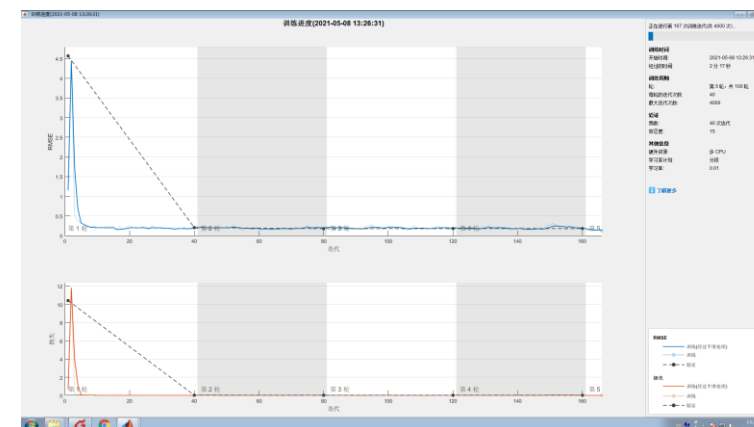
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? CNN 模型训练.

- 使用本地机器进行训练
  - MATLAB可管理和调度本地机器上的CPU和GPU计算资源
- 使用远程计算集群进行训练
  - 采用Mathworks提供的MPS对远程机器计算资源进行调度
  - 在本地机器上安装的MATLAB开发matlab程序代码
  - 从本地机器向远程计算集群提交计算任务
  - 比本地机器训练速度快3-5倍



# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

如何预测一个区域的风电功率? 并行资源配置和管理.

- MPS Job scheduler
  - 使用图形化工具创建job schedulers
  - 管理所需要的计算资源
  - 管理员可对每个用户分配计算资源
- 数据存储于分布式存储集群中
  - 大规模数据存储在基于HDFS的存储集群
  - 采用并行读取策略获取训练数据

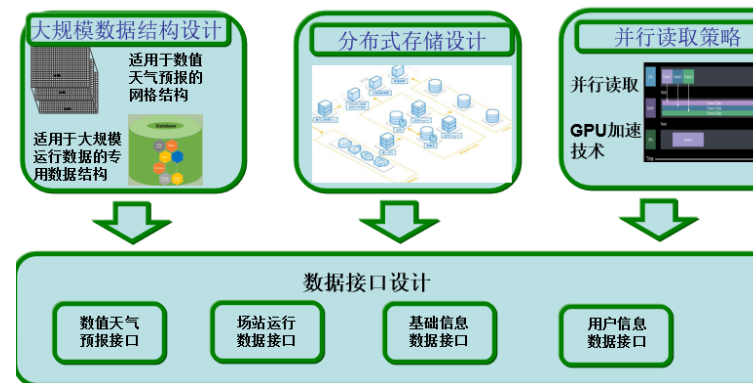
| Add or Find...       | Host                | Reachable | Cores | Status      | MPS Service | Up Since         | MATLAB Job Scheduler | Workers |
|----------------------|---------------------|-----------|-------|-------------|-------------|------------------|----------------------|---------|
| Start MPS Service... | sdw1 (192.168.10.1) | yes       | 16    | running     | ---         | 2021-05-08 13:45 | MJobScheduler        | 8       |
| Stop MPS Service...  | sdw2 (192.168.10.2) | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |
| Test Connectivity... | sdw3 (192.168.10.3) | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |
|                      | sdw4                | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |
|                      | sdw5                | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |
|                      | sdw6                | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |
|                      | sdw7                | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |
|                      | sdw8                | yes       | ---   | unavailable | ---         | ---              | ---                  | ---     |

| MATLAB Job Scheduler | Name          | Hostname | Status  | Up Since         | Workers |
|----------------------|---------------|----------|---------|------------------|---------|
| Start...             | MJobScheduler | sdw1     | running | 2021-05-08 13:45 | 8       |
| Stop...              |               |          |         |                  |         |
| Resume               |               |          |         |                  |         |

| Workers  | Name          | Worker | Status | Up Since         | Connection | MATLAB Job Scheduler | Hostname |
|----------|---------------|--------|--------|------------------|------------|----------------------|----------|
| Start... | sdw1_worker01 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |
| Stop...  | sdw1_worker02 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |
| Resume   | sdw1_worker03 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |
|          | sdw1_worker04 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |
|          | sdw1_worker05 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |
|          | sdw1_worker06 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |
|          | sdw1_worker07 | sdw1   | idle   | 2021-05-08 13:45 | connected  | MJobScheduler        | sdw1     |



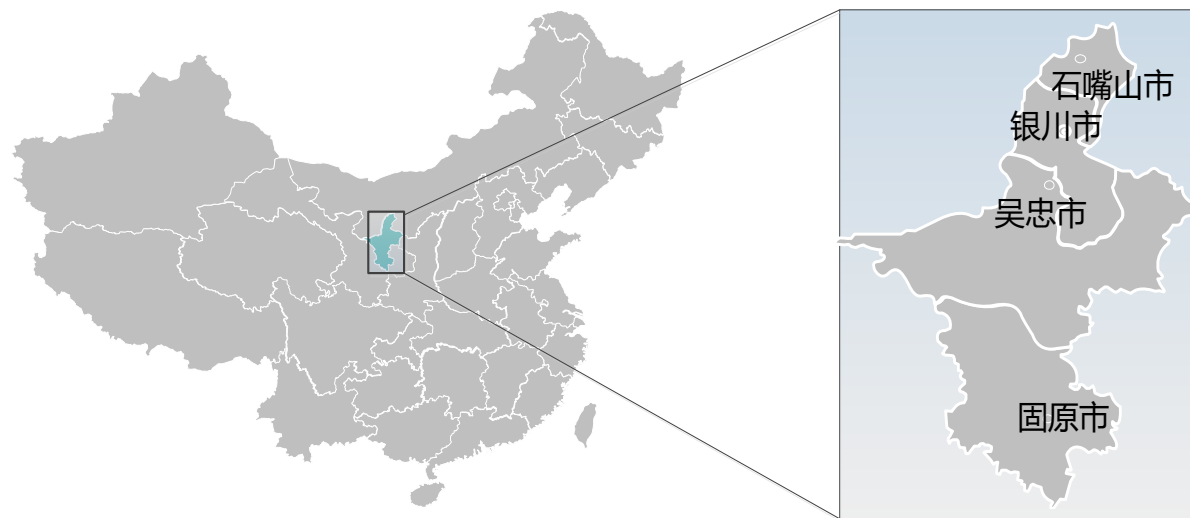
# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

针对一个区域的风电功率预测

算例.

- CEPRI数值天气预报中心网格NWP数据
  - 覆盖整个区域的网格NWP
  - 本算例包括100m风速、10m风速、大气压等参数
  - 基于CEPRI开发的网络结构自动搭建和评估工具选择最优ResNet结构
- ResNet
  - 基于自动搭建工具采用交叉验证方式选择最优网络架构
  - 区域模型与简单模型训练时间: 48min VS 153min



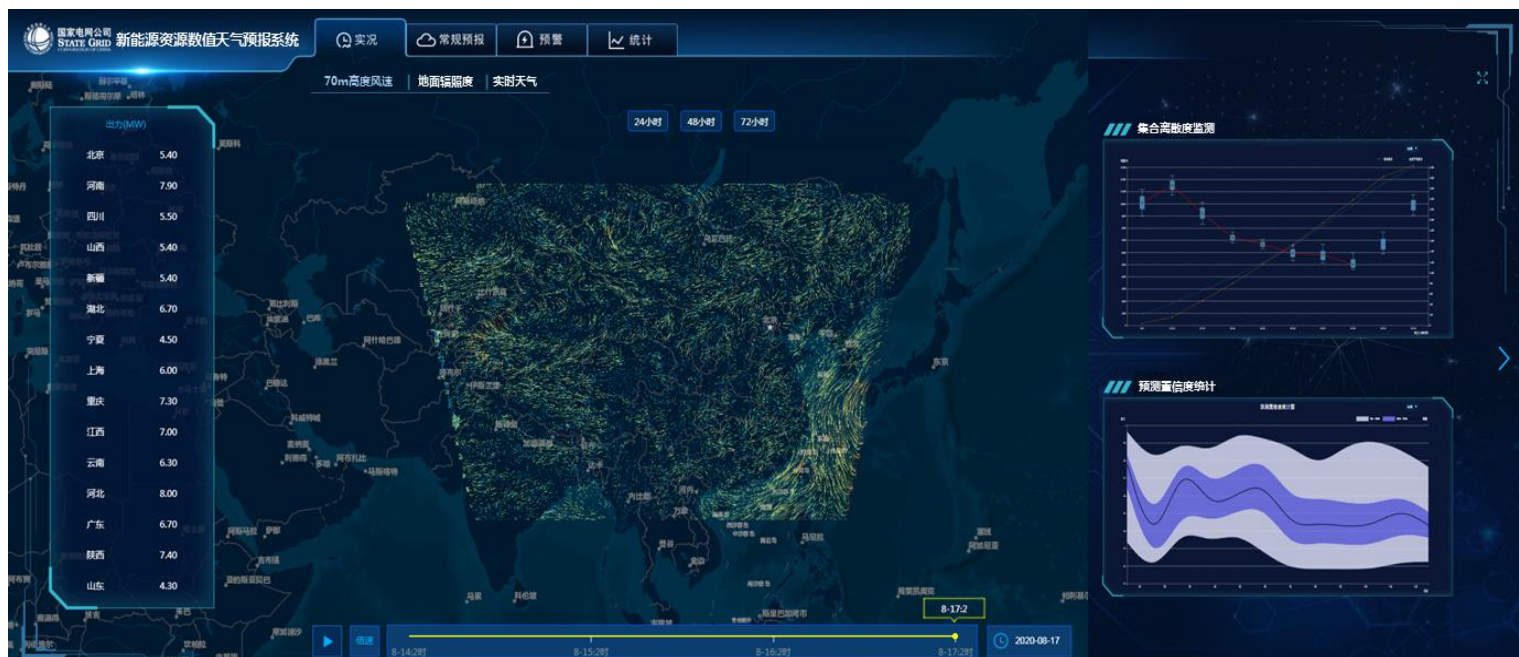
| Method | July   | August | September | October | November |
|--------|--------|--------|-----------|---------|----------|
| Simple | 0.0850 | 0.0804 | 0.0798    | 0.0940  | 0.1394   |
| CNN    | 0.0602 | 0.0673 | 0.0756    | 0.0872  | 0.1294   |

# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

### 我们的产品

- 数值天气预报服务
  - 每日发布两次NWP结果, 08:00 and 20:00;
  - 覆盖全国, 对各地提供定制化NWP服务;
  - 空间分辨率3kmX3km, 时间分辨率15min, 预测时长10 days.



# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

### 我们的产品

- 新能源功率预测中心RE generation prediction center
  - 可为我国大部分新能源场站及区域提供功率预测服务;
  - 每日分别在08:00 和20:00发布两次预测结果;
  - 预测服务提供中长期电量预测、短期功率预测、概率预测、集群功率预测等 ...

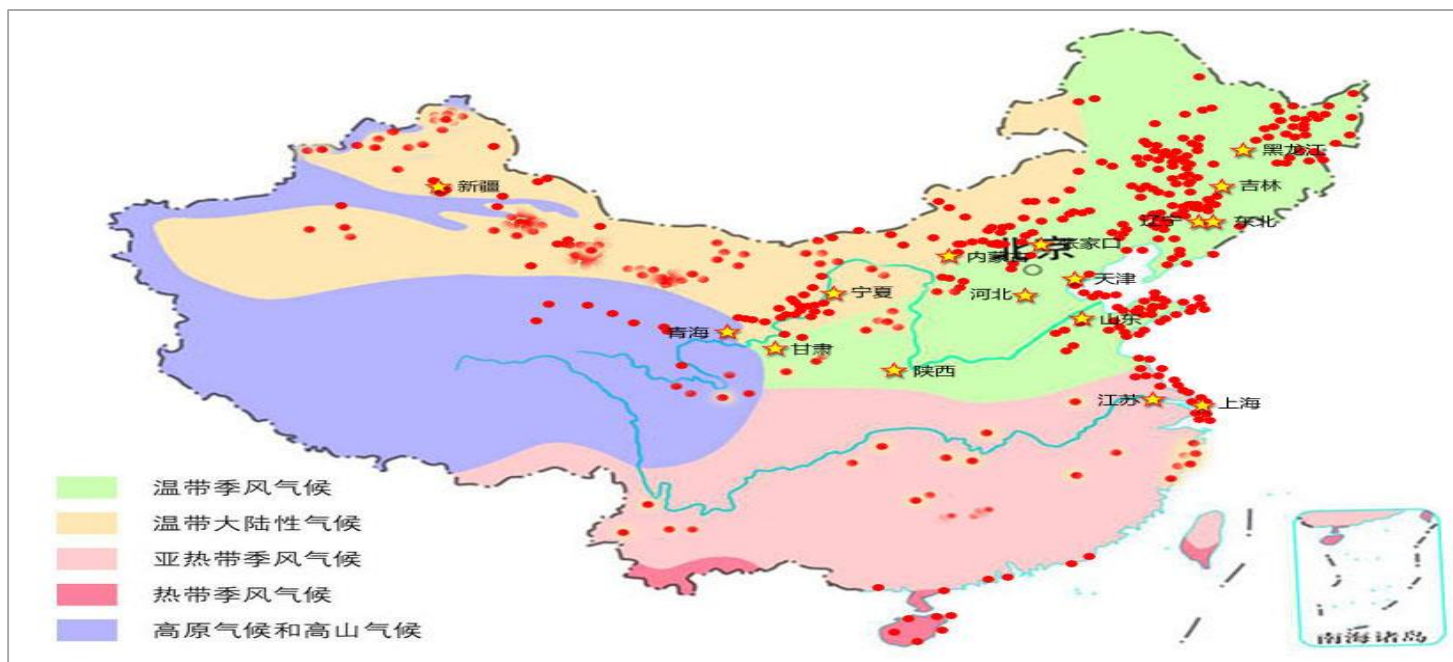


# 基于机器学习的短期风电功率预测

## Short term wind power forecasting based on machine learning

### 我们的产品

- 风电功率预测系统
  - 在我国27个省级调度机构部署了功率预测系统;
  - 为超过5000座风电场提供预测服务s ;
  - 大部分CNN预测模型基于Mathworks开发.



# 新能源功率预测标准

## Standards on RE power forecasting

■ 已发布

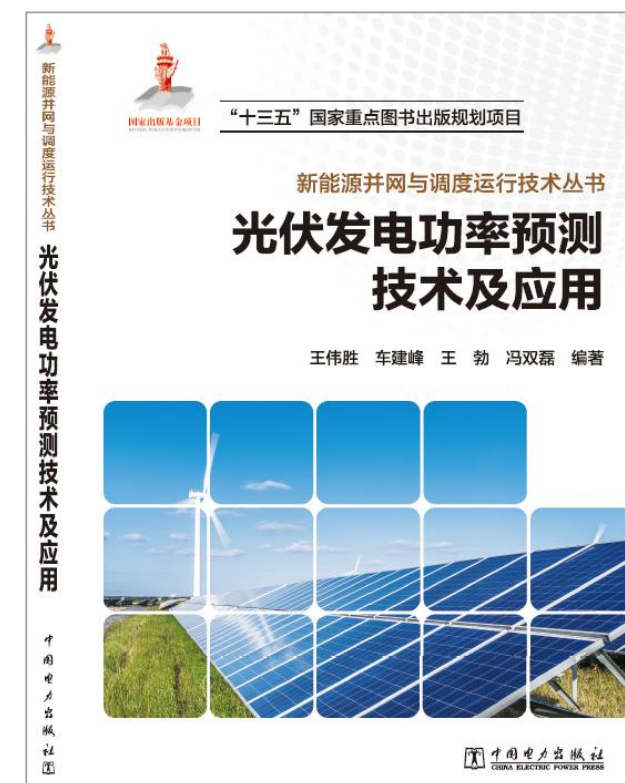
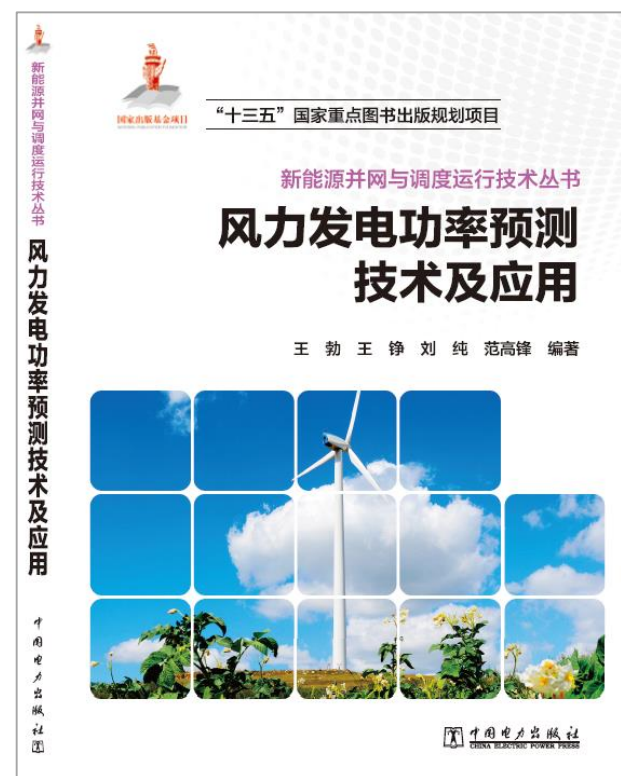
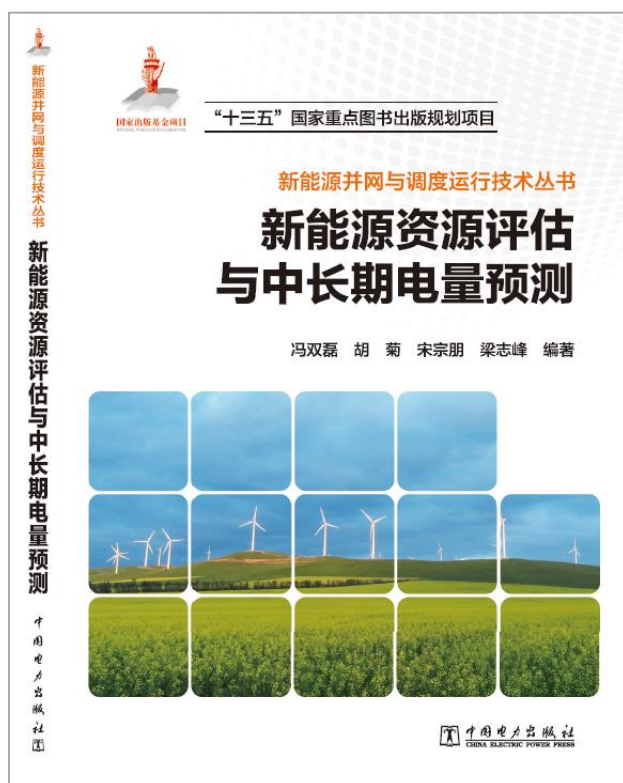
| 编号 | 标准名称                              | 类别   | 编号              | 编制单位         |
|----|-----------------------------------|------|-----------------|--------------|
| 1  | Renewable Energy Power Prediction | 国际标准 | IEC TR 63043    | 中国电科院牵头      |
| 2  | 风电功率预测系统功能规范                      | 行业标准 | NB/T 31046—2013 | 中国电科院、国调中心等  |
| 3  | 光伏电站功率预测系统技术要求                    | 行业标准 | NB/T 32011—2013 | 中国电科院、国网电科院等 |
| 4  | 光伏电站太阳能资源实时监测技术规范                 | 行业标准 | NB/T 32012—2013 | 中国电科院、国网电科院  |
| 5  | 风电场理论可发电量与弃风电量评估导则                | 行业标准 | NB/T 31055—2014 | 中国电科院、国网能研院  |

■ 正在进行

| 编号 | 标准名称          | 类别   | 状态 | 编制单位    |
|----|---------------|------|----|---------|
| 1  | 新能源功率预测技术规范   | 国家标准 | 送审 | 中国电科院牵头 |
| 2  | 风电场受限电量评估导则   | 国家标准 | 送审 | 中国电科院牵头 |
| 3  | 风电场接入电力系统技术规定 | 国家标准 | 报批 | 中国电科院牵头 |

# 新能源功率预测出版物

## Publications on RE power forecasting



# MATLAB EXPO 2021

Thank you



© 2021 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.