



中国电建
POWERCHINA

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司
BEIJING ENGINEERING CORPORATION LIMITED

务实 创新 担当 共赢

风电场功率曲线验证及性能 评估研究

<http://www.bhidi.com>

数据少

- 通过中尺度
- 再分析数据
- 乏资料地区中小尺度耦合等等
- 我们行业内很多手段，各个咨询机构都有自己开发的平台。

数据多，且多到一定程度呢？

- 上亿行的数据表怎么办？
- 设计节奏也加快了呢？



我们在风电场后评价项目中，往往会遇到对风机SCADA运行数据的整理和分析：

一台风机运行
一年，产生数据量
3100万条秒级数据

。

全场风机运行
多年，就会有**数十亿**
条秒级数据。



CONTENTS

目录

- 第一部分：总体概况
- 第二部分：数据平台演示
- 第三部分：项目应用
- 第四部分：创新点
- 第五部分：结语与展望

第一部分：总体概况

- 项目提出的背景
- 主要研究内容
- 项目开发技术路线
- 主要研究成果
- 任务书完成对比情况
- 预期效益

PART 01

1.1 项目背景

风电机组更新换代加快，生产运维面临诸多痛点问题

生产运行人员对风电机组运行机理不熟悉、不能正确评估机组的实际运行情况。

风电机组运行中存在诸如运行效率低、功率曲线不达标、可利用率水平偏低、风电机组真实可利用率存疑、风电机组故障分布和故障解决方案不明确、发电量评估方法不明确等一系列问题。



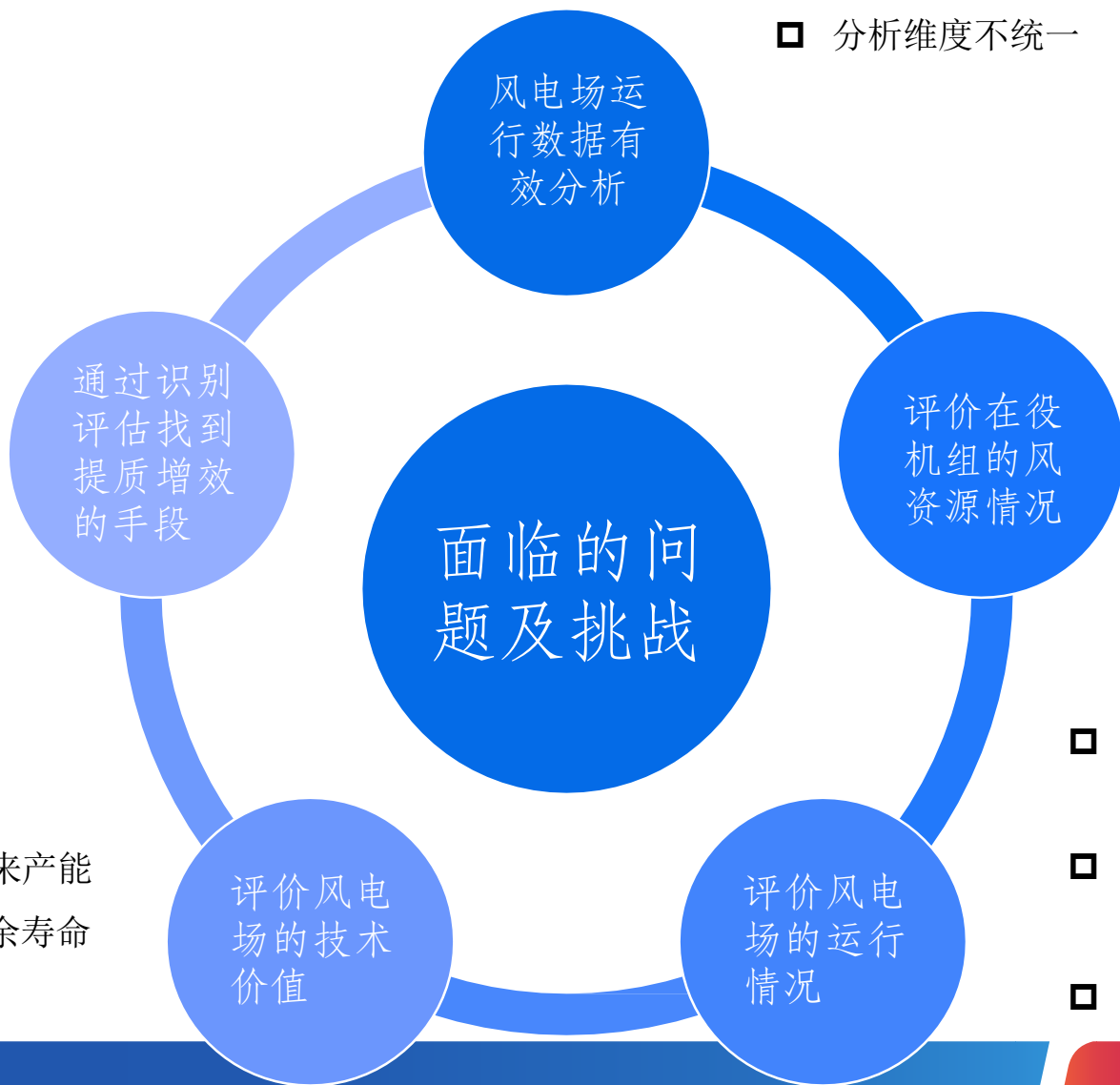
通过研究风电机组运行数据、功率曲线验证、发电量评估等技术，深入了解风电机组运行水平，指导风电场的运维，

更推动风电场管控技术水平，并将之拓展至其他未开展此次研究工作的风电场，提升利润。

1.2 项目主要研究内容

- ❑ 风电场的应发到底是多少
- ❑ 性能是否达到设计值
- ❑ 故障影响多少发电量
- ❑ 是否可以通过技改提升发电量（移机、加长叶片、更换叶片等）

- ❑ 如何评价在役机组的未来产能
- ❑ 如何评价在役机组的剩余寿命

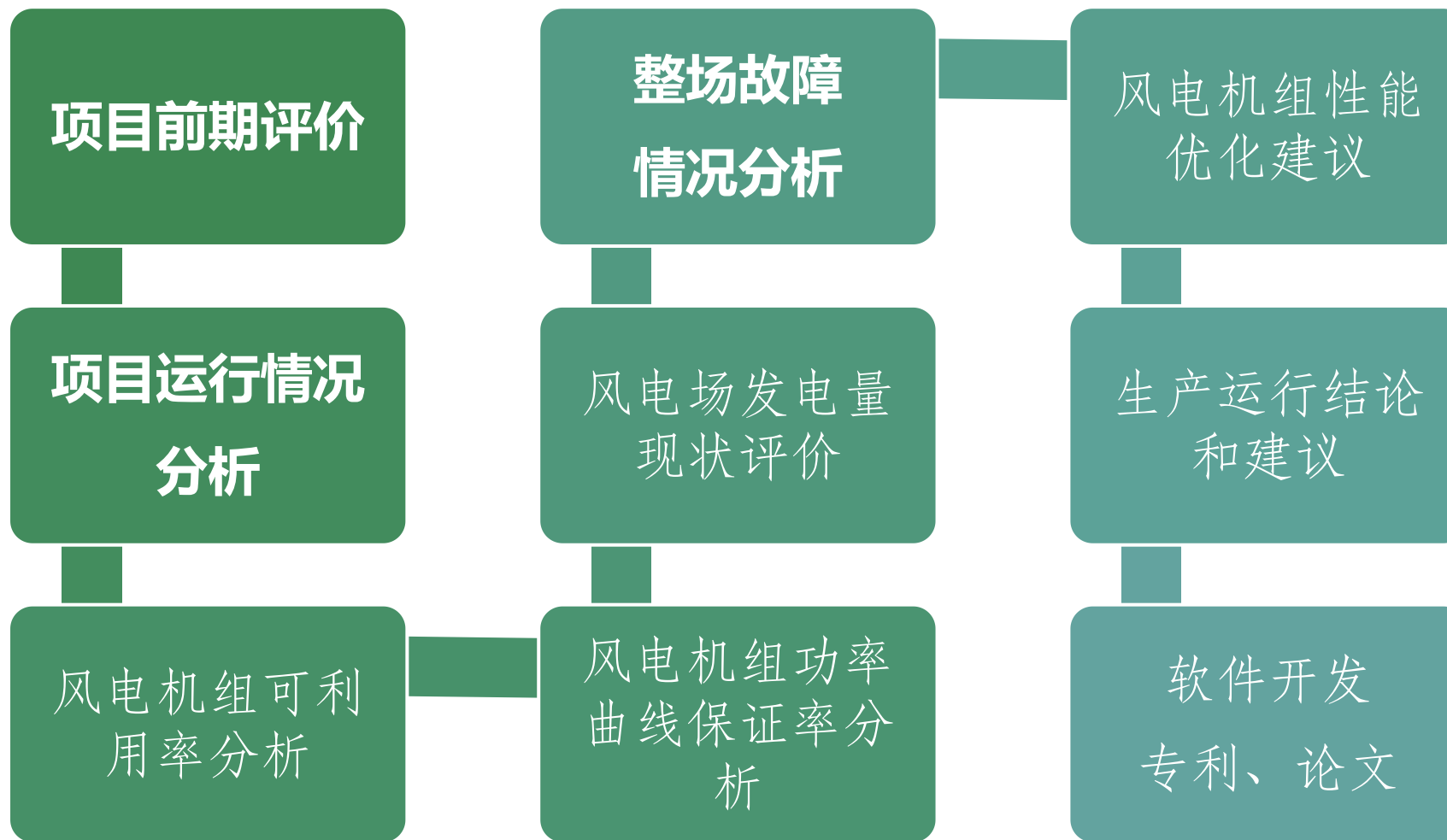


- ❑ 数据量大
- ❑ 数据命名不统一
- ❑ 分析维度不统一

- ❑ 在役机组实际风况到底如何（风速受干扰、相对风向）
- ❑ 如何解耦风资源和机组对于发电量的影响
- ❑ 实际的折减系数到底是多少

- ❑ 时间可利用率（客户角度、整机厂商角度、自定义）
- ❑ 能量可利用率（客户角度、整机厂商角度、自定义）
- ❑ 功率曲线是否达标

1.3 项目开发技术路线



1.4 项目实施路线

实施路径：

机舱风资源评估

测风塔和最近风机在自由扇区的风速相关关系
还原机组的风速风向

能量可利用率分析

对机组的潜在发电量和损失发电量计算分析

产能分析

采用插补后的机组数据计算理论产能，并重新评估风电场未来的产能

增功提效方案

依据评估的结论和实际风资源的情况定制化解决方案

1

2

3

4

5

6

7

8

资料收集

前期资料：微选报告，复核报告，前期测风塔资料，机位坐标，地形图
运行期资料：机组型号、测风塔数据，SCADA运行数据，瞬时数据，月报、年报，运维故障记录，风功率预测塔资料等

时间可利用率分析

对运行时间进行分类汇总分析；
TBA、MTBF

功率曲线分析

按照标准绘制功率曲线；采用风参数标准化功率曲线，分析异常；找到适合的方法分析是否达到设计值

前期设计对比及优化

验证模型的准确性；验证特殊地形的影响；验证测风塔的代表性；验证风机性能是否达标

1.5 主要研究成果

1、风资源数据整理分析

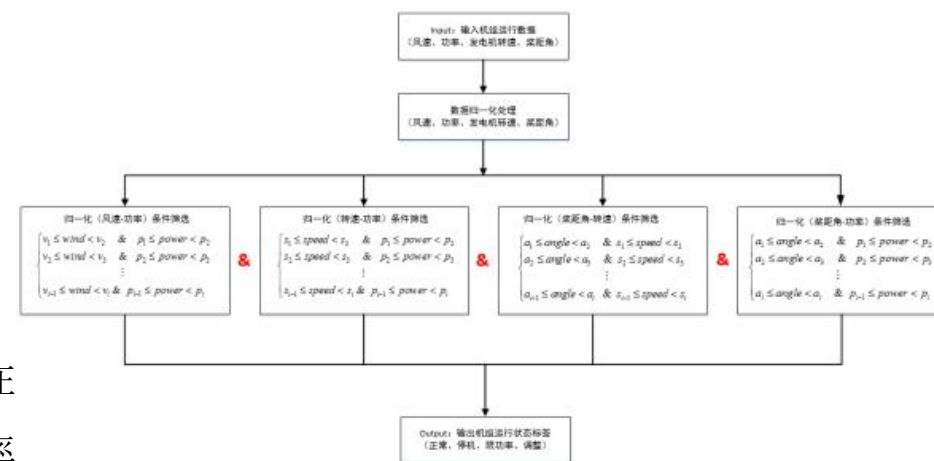
- 利用风电场前期阶段的测风数据、运行期的风功率预测塔数据、风机运行时段的SCADA数据、AWS中尺度数据进行多维度风速拟合验证，整理出最接近风场风况风速数据，作为资源评估的依据。

2、实时测风与实时运行数据拟合验证

- 风电场内部树立激光雷达开阵同期测风，将风机运行的SCADA风速数据还原到自由流风速水平。与风机自身的保证功率曲线进行验证，找到低效风机，找到低效原因，提出提质增效方案，提升发电量水平，提升风电场经济效益。

3、数字化开发相结合

- 通过开发可用于风电场功率曲线识别评估的全流程可视化模块化分析软件，初步实现自动识别评估功能。
- IEC 标准中规定了12种信息分类，此信息分类作为判断是否存在能量损失的核心依据。这些信息分类在大部分的数据采集与监视控制系统中没有直接对应，本课题结合IEC 信息分类，将风电机组的运行状态划分为四种状态，分别是：
 - 正常运行（风机正常运行发电）
 - 正常停机（风速不具备发电条件而停机）
 - 限功率运行（风机的转速-桨距角-功率存在稳定的不匹配过程）
 - 调整过程中（风机的转速-桨距角-功率存在短暂的不匹配过程）
 - 脱网过程中（风机的转速和功率之间存在正常的不匹配关系）
 - 非正常停机（风速具备发电条件，但是分风机处于未发电状态）
 - 并网加速中（风速具备发电条件，桨距角处于较低角度，转速在
 - 机组状态的划分依据来自机组运行曲线：风速-功率、转速-功率



1.5 主要研究成果

4、编制了风电机组功率特性及性能评估研究报告

- 根据东岗岭、涟源龙山两风电场开展复杂山地风电场流场模型建模工作评估项目发电量；结合风电场实际运行数据，验证厂家功率曲线保证率、可利用率、故障分析等，找到低效风机，并完成两项目《风电机组功率特性及性能评估研究报告》

5、形成软件应用、专利、论文成果

- 根据项目评估过程、数据分析工程、功率曲线验证过程，形成两项目的软件应用，成功风电提升数据识别评估效率；
- 完成专利《一种风力发电多级利用装置》
- 完成论文《基于激光雷达实测数据的风电机组功率曲线测试应用与实例分析》、《基于SCADA数据的风电机组可利用率评价方法研究》。

第二部分：数据平台演示

PART 02

2. 数据平台应用演示

```
1 import os
2 import glob
3 import pandas as pd
4
5
6
7
8 for a in range(1,2):
9     #file_dir = 'Z:/原始数据/五凌项目数据整理/海源龙山/海源龙山风电场风机运行秒级数据/定义字段/龙山风场2020年解压/2020geshihua/' + str(a) + '/'
10    file_dir = 'Z:/原始数据/五凌项目数据整理/东岗岭项目/东岗岭风电场风机运行秒级数据/2018jieya上半年/1/21744'
11    path = file_dir
12    outputpath = 'Z:/原始数据/五凌项目数据整理/海源龙山/海源龙山风电场风机运行秒级数据/定义字段/龙山风场2020年解压/2020geshihua/' + str(a) + '/'
13    for file in os.listdir(path):
14        df = pd.read_csv(path+file)
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
```

Python 控制台

```
Type 'copyright', 'credits' or 'license' for more information
IPython 7.18.1 -- An enhanced Interactive Python. Type '?' for help.
PyDev console: using IPython 7.18.1

Python 3.8.5 (tags/v3.8.5:580fbb0, Jul 20 2020, 15:57:54) [MSC v.1924 64 bit (AMD64)] on win32
In[2]:
```

首先根据不同风机秒级数据，开发不同的数据批量处理脚本

2.1 平台介绍

1. 风机秒级数据处理:

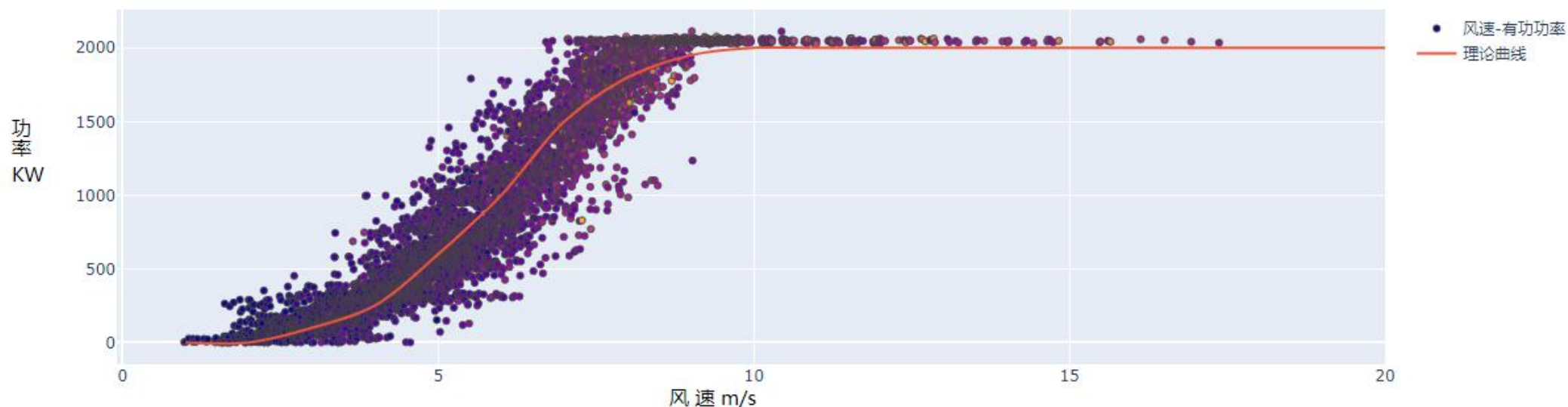
风机秒级数据计算, 风机秒级故障数据统计, 转换并统一数据格式, 数据集成, 去除噪声数据。

2. 风机秒级数据出图:

折线图, 散点图, 统计直方图。

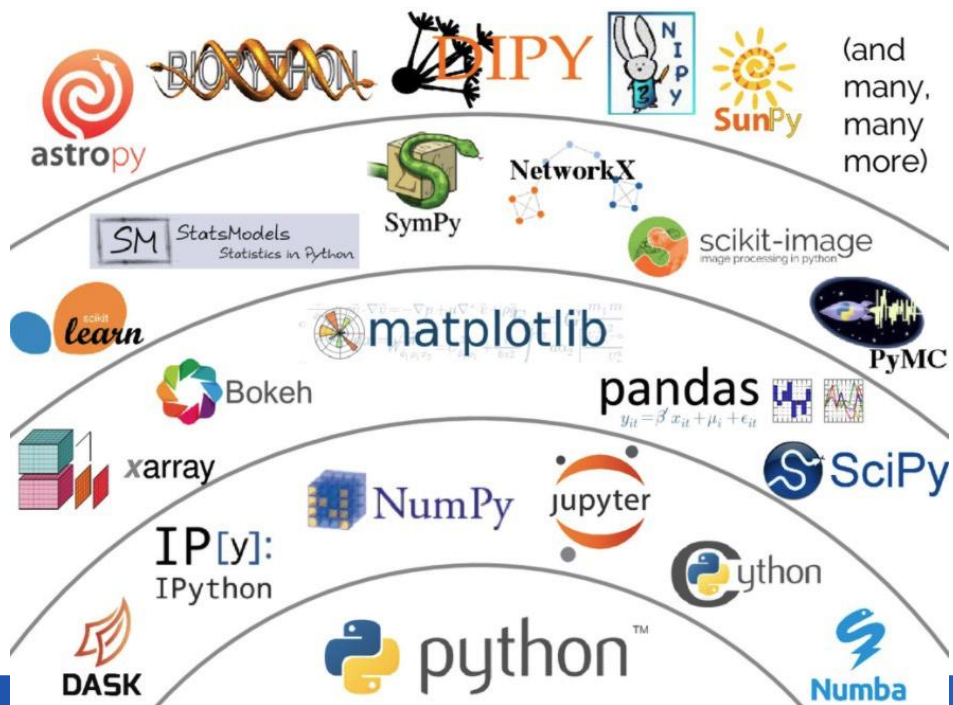
3. 数据图灵活操作:

软件对于数据图可以进行以下操作: 下载、调整任意缩放、区块重点显示、一键归位、鼠标悬停显示、修改时间段、选择不同风机、选择图形、输入x轴、输入y轴、输入故障编号等。



2.2 技术路线——数据处理

1. 数据处理脚本，基于Python的大数据处理库，调用里面的方法对数据进行导入、导出、连接、合并、分组、插入、拆分、透视、索引、切分、转换、函数计算等。
2. 用自定义的函数处理数据，对数据进行格式化清洗，包含：截取数据、查看数据是否有异常值、删除无用的字符串（列、空值、重复数据等）、重新排列、重命名索引等操作。



2.3 技术路线——数据存储的技术优势

1. 数据存储技术

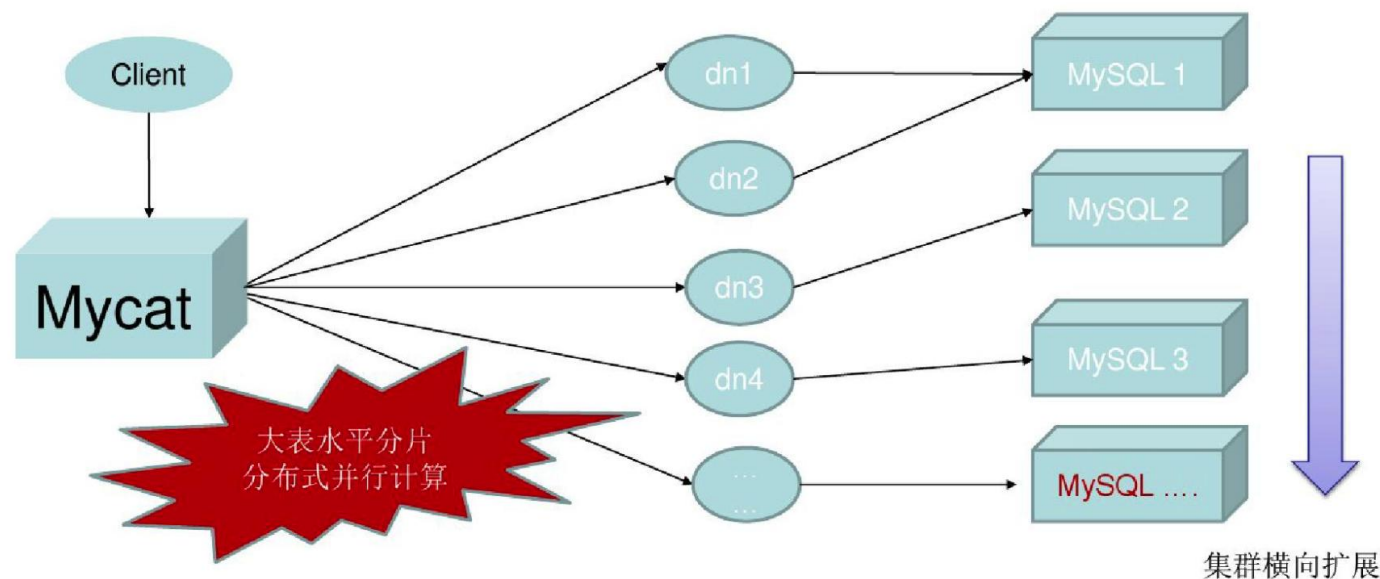
基于Mycat, Mycat 是目前最流行的基于 java 语言编写的数据库中间件, 简单来说 MyCat就是实现数据库集群的, 是一个分布式数据库, 对海量数据的数据存储的一种新型解决方案。

2. 使用 Mycat 的优势

- 通过mycat, 可以管理若干 MySQL 数据库, 将传统数据库进行切片分布式处理, 存储的数据量大;
- 后期无论平台应用、软件应用, 利用mycat对数据分析及查询的效率高。
- Mycat 版本提升较快, 可以跟随环境发展。如果有问题, 可以快速解决。

Mycat典型应用场景

三：100亿大表水平分片，集群并行计算



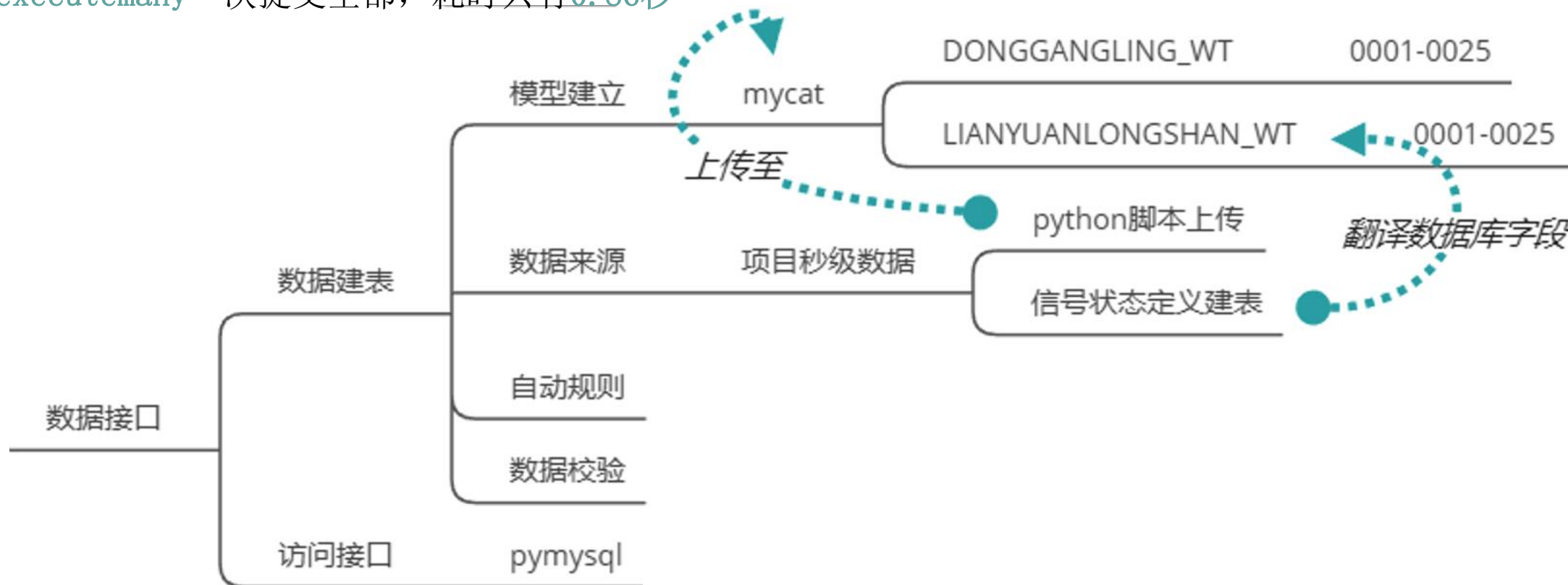
2.3 技术路线

批量上传至数据库（executemany）

一共**10000条数据**

正常一行行**循环insert**，耗时**200秒**左右

而用**executemany**一次提交全部，耗时只有**0.86秒**……



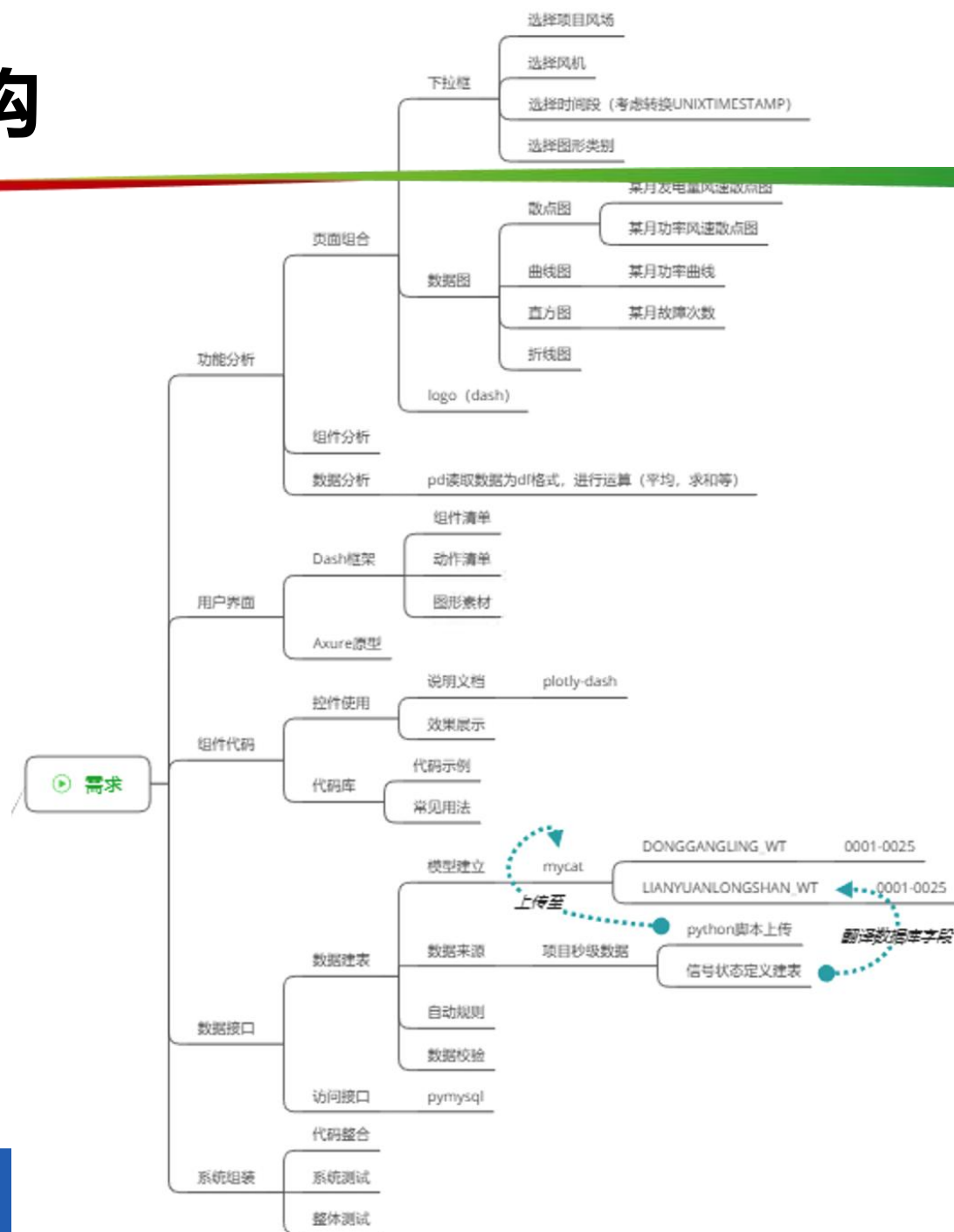
2.3 技术路线——可视化平台



总结来说，Plotly-Dash框架，可以用更简洁清晰的项目管理、集成度高、按需部署。不同机型scada数据格式不同，需进行定制化处理，按需开发，实现海量秒级数据的可视化分析平台。

2.3 技术路线——整体架构

整个项目架构包括功能分析、用户界面、组件代码、数据接口、系统组装。



2.4 工作依据

标准编号	IEC61400-12-1	IEC61400-12-2	IEC61400-26-1	IEC61400-26-2
标准发行时间	Ed1:2005年12月	2013年3月	2011年11月	2014年6月
	Ed2:2017年03月			
标准内容	风力发电机组功率特性测试	基于机舱风速计的风电机组功率特性测试标准	风力发电机组基于时间的可利用率	风力发电机组基于能量的可利用率
目的	提供一种统一的方法，保证风力发电机组功率特性测试和分析的一致性、准确性和可重复性	提供一种基于机舱风速计的风力发电机组功率特性量、分析和报告的统一方法	为风力发电行业内的业主、电力公司、贷款人、运营商、制造商、咨询机构、监管机构、认证机构、保险公司以及其他相关方进行性能指标信息交换建立一个共同的基础	旨在定义基于发电量的可用率的信 息交换通用平台。该目标通过信息模型的使用实现，该模型规定了将时间概念和电量概念分配给不同信息类别的方法，以及用于发电量术语的方法
适用范围	1. 风力发电机组制造商 2. 风力发电机组购买者 3. 风力发电机组运营商 4. 风力发电机组计划者或者更改者	仅适用于足够大的水平轴风力发电机组，机舱风速计对叶片和机舱周围气流不产生明显影响	1. 风力发电机组制造商 2. 风力发电机组购买者 3. 风力发电机组运营商 4. 风力发电机组计划者或者更改	1. 风力发电机组制造商 2. 风力发电机组购买者 3. 风力发电机组运营商 4. 风力发电机组计划者或者更改者

Two vertical lines, one blue and one green, are positioned to the left of the section header.

第三部分：项目应用

A decorative wavy background at the bottom of the slide, featuring a gradient from orange to red to green.

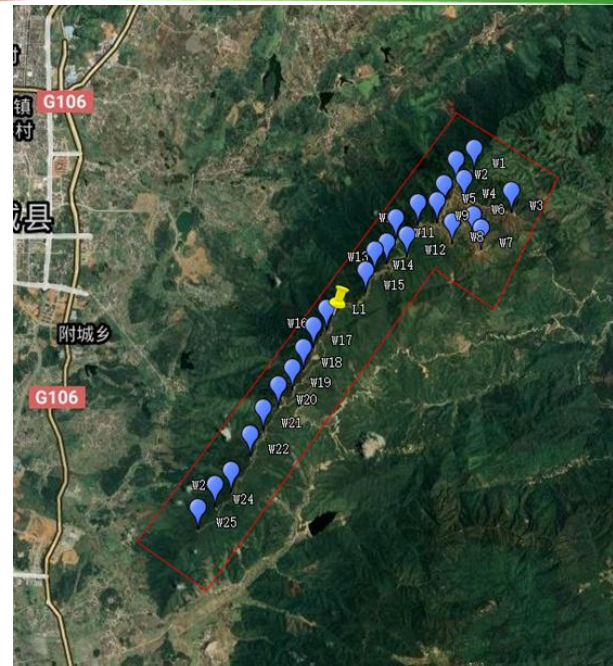
PART 03

3.1项目研究成果 项目概况

风电场位于湖南省郴州市汝城县境内，场址范围呈一个不规则的图形，场址长约8.2km，总面积约7.0km²。海拔高度在1047m~1468m之间。

根据国际标准IEC61400-12-2对机舱风速进行修正，对新建测风塔地形与相对应机组地形进行校验后，剔除尾流影响扇区来修正机组机舱风速。本项目依据标准选取激光雷达点位1个，用于机组功率曲线评估工作。激光雷达点位L2位于场区中部，#16风机东北方向293m，海拔约为1352m。

提取自由流扇区之后，L2雷达和#16机组共有5681条同期10min数据，数据相关性 $R^2=0.804$ ，一次线性拟合NTF函数为 $Y=1.075X$ （Y为自由流风速，X为机舱测量风速）。其中L2雷达平均风速为5.17m/s，#16机组同期平均风速为4.53m/s。



3.1项目研究成果

资料收集

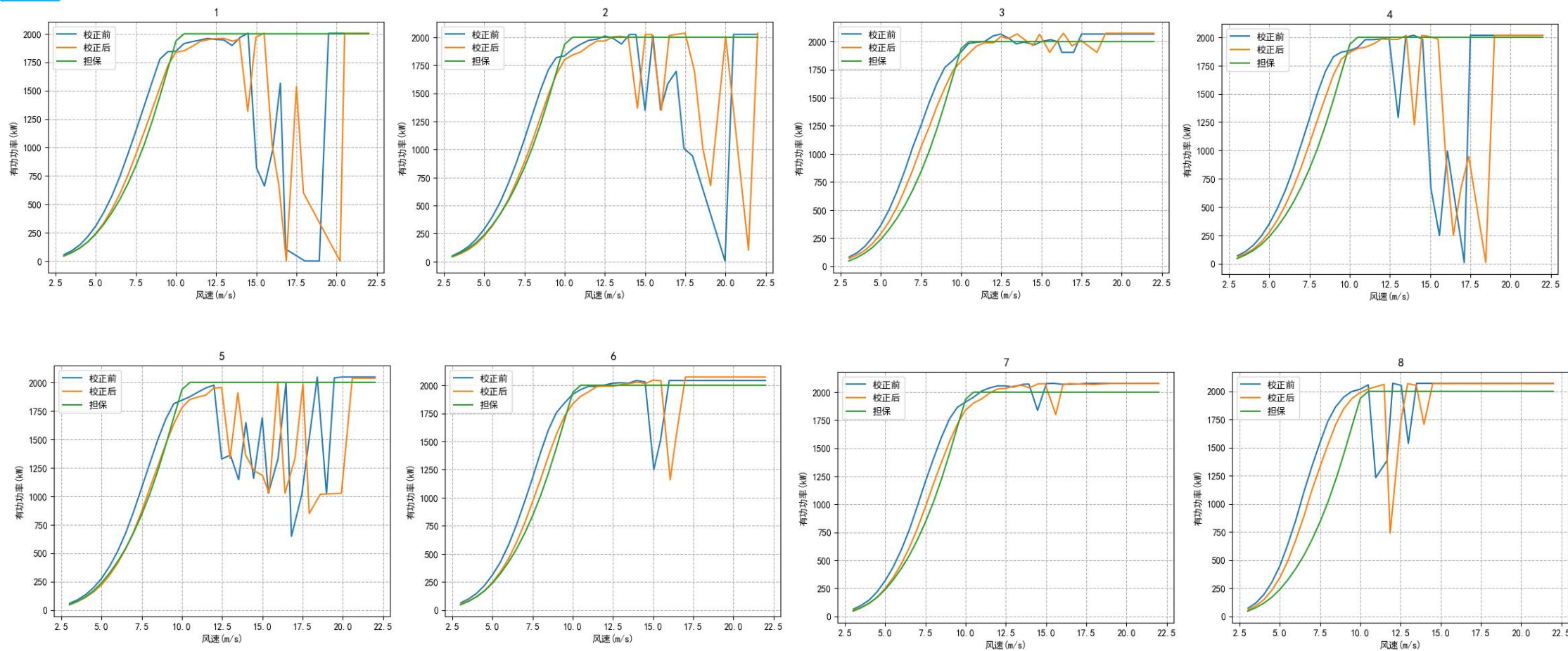
阶段	序号	材料名称	已收集情况
前期资料	1	可研报告	√
	2	微观选址报告	√
	3	等高线地图	√
	4	前期测风数据	3805#20130528-20140214 7073#20070815-20101221
运维资料和数据	5	风电场基本信息	√
	6	风场配置信息	√
	7	风电场机位编号和位置	√
	8	中控综合年报表及月报表	未提供
	9	风电场运行月报	2015-2020年各线路统计电量
	10	电网月结算电量	2015-2020
	11	SCADA5min平均数据	2020.08.01-2021.07.31
	12	机组数据中各种状态信号的定义	未提供“风机当前状态值”信号定义
	13	合同功率曲线	√
	14	中控故障日志	未提供
	15	大面积停机统计报表	√
	16	SCADA秒级数据	2018年 2020.01.01-2021.07.31
	17	风功率预测塔实测数据	2015-2020
	18	备件消耗统计表	叶片及叶片螺栓等

功率曲线分析

机组编号	功率曲线符合度	机组编号	功率曲线符合度
#1	94.3%	#14	92.3%
#2	96.4%	#15	97.3%
#3	94.6%	#16	99.7%
#4	93.4%	#17	92.3%
#5	95.9%	#18	91.6%
#6	94.1%	#19	95.2%
#7	93.2%	#20	95.6%
#8	92.2%	#21	98.0%
#9	96.0%	#22	92.8%
#10	88.3%	#23	94.8%
#11	93.5%	#24	95.4%
#12	95.2%	#25	96.2%
#13	95.8%	平均	94.6%

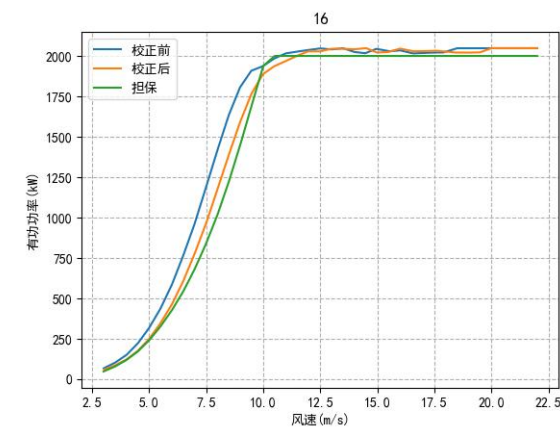
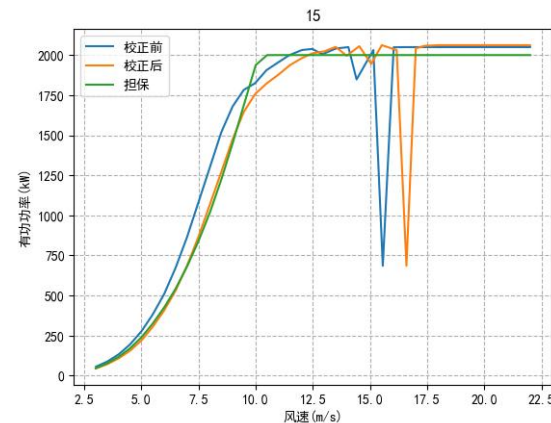
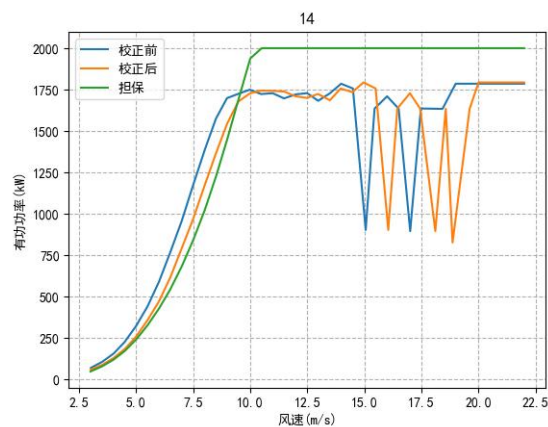
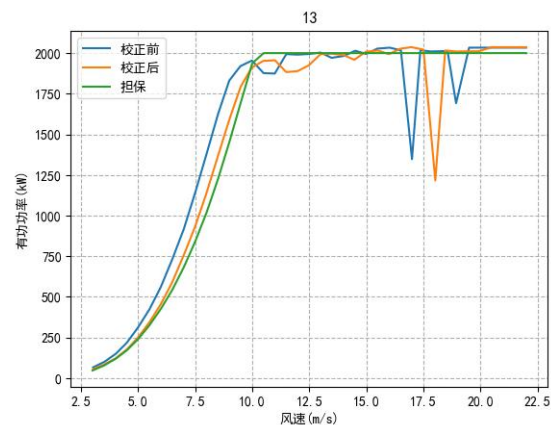
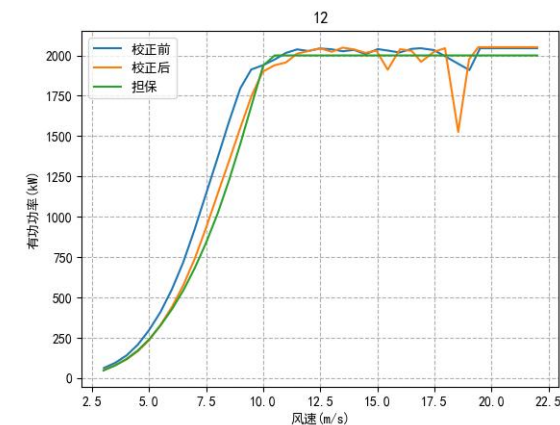
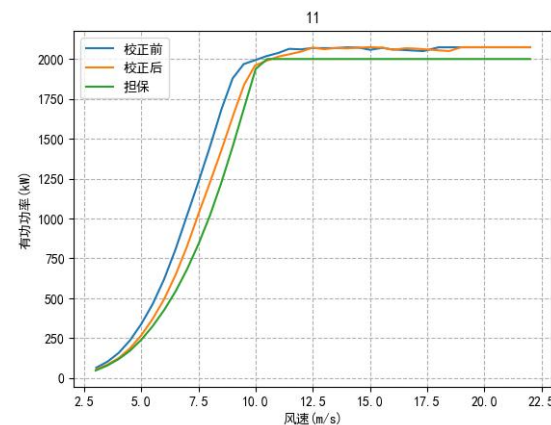
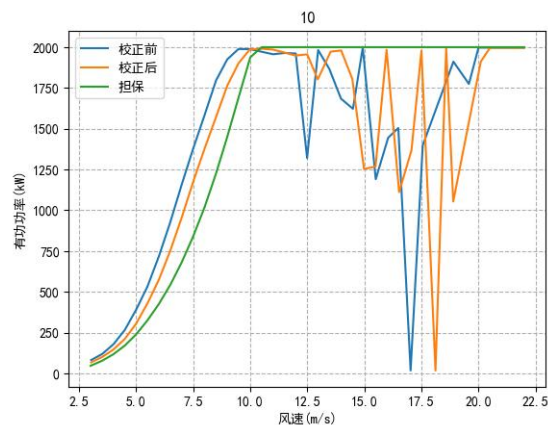
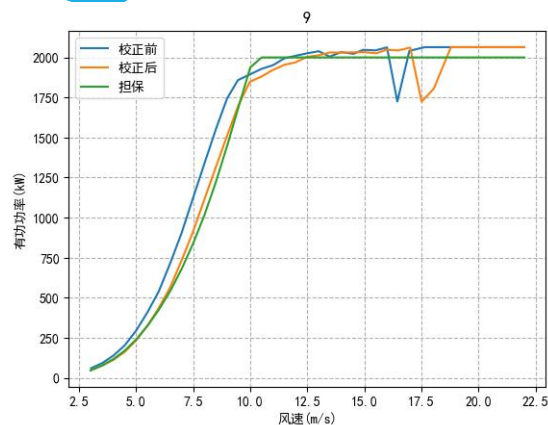
3.1项目研究成果

功率曲线



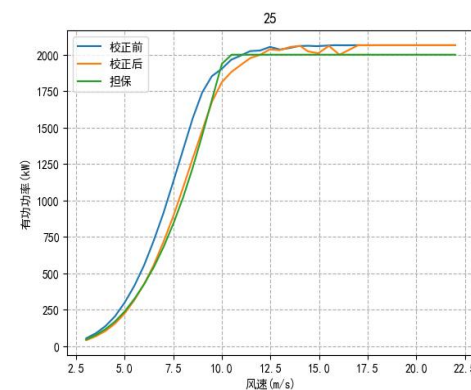
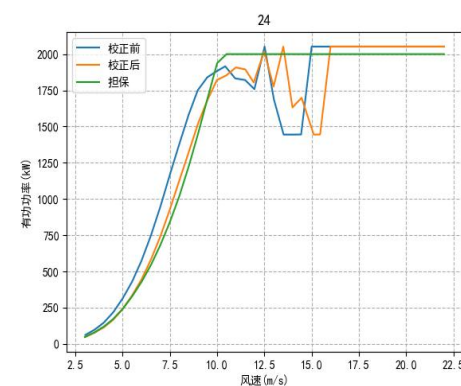
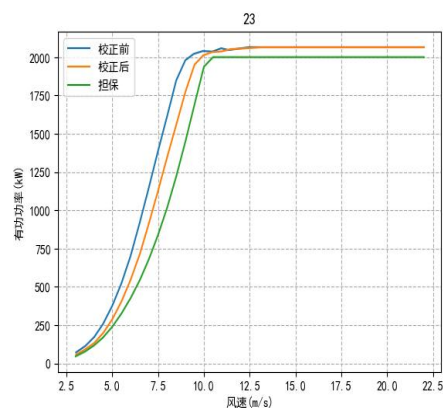
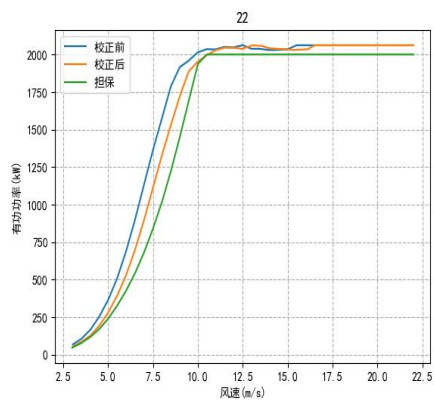
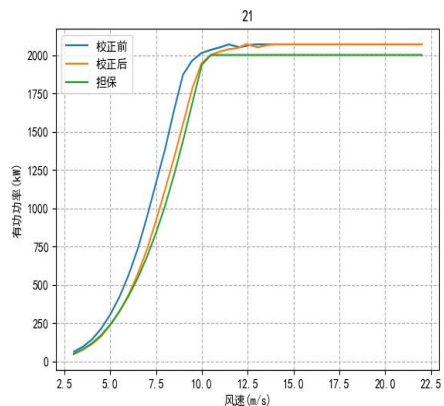
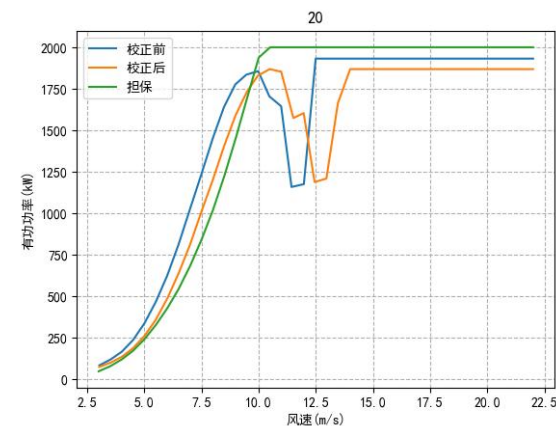
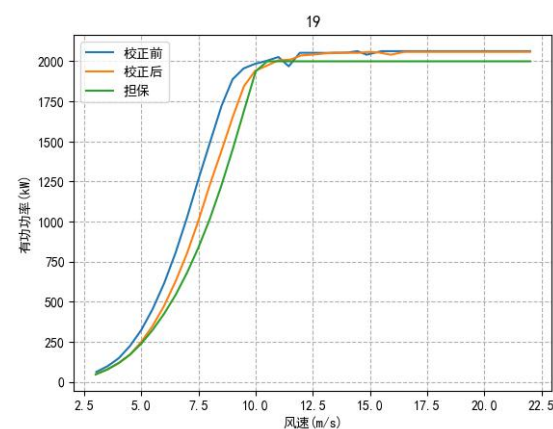
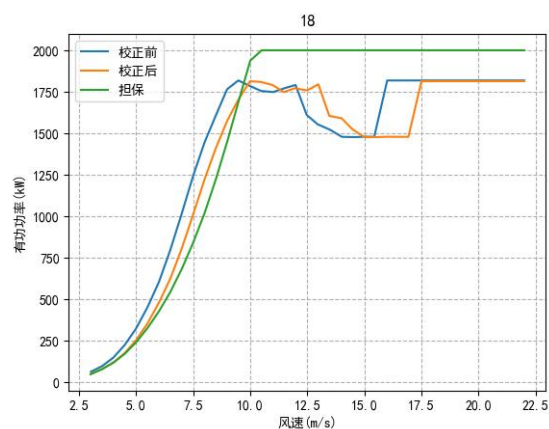
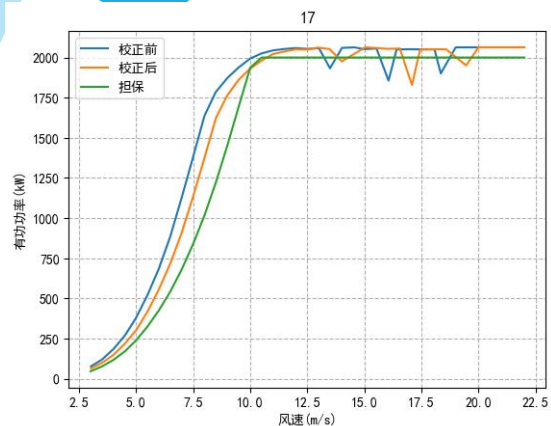
3.1项目研究成果

功率曲线



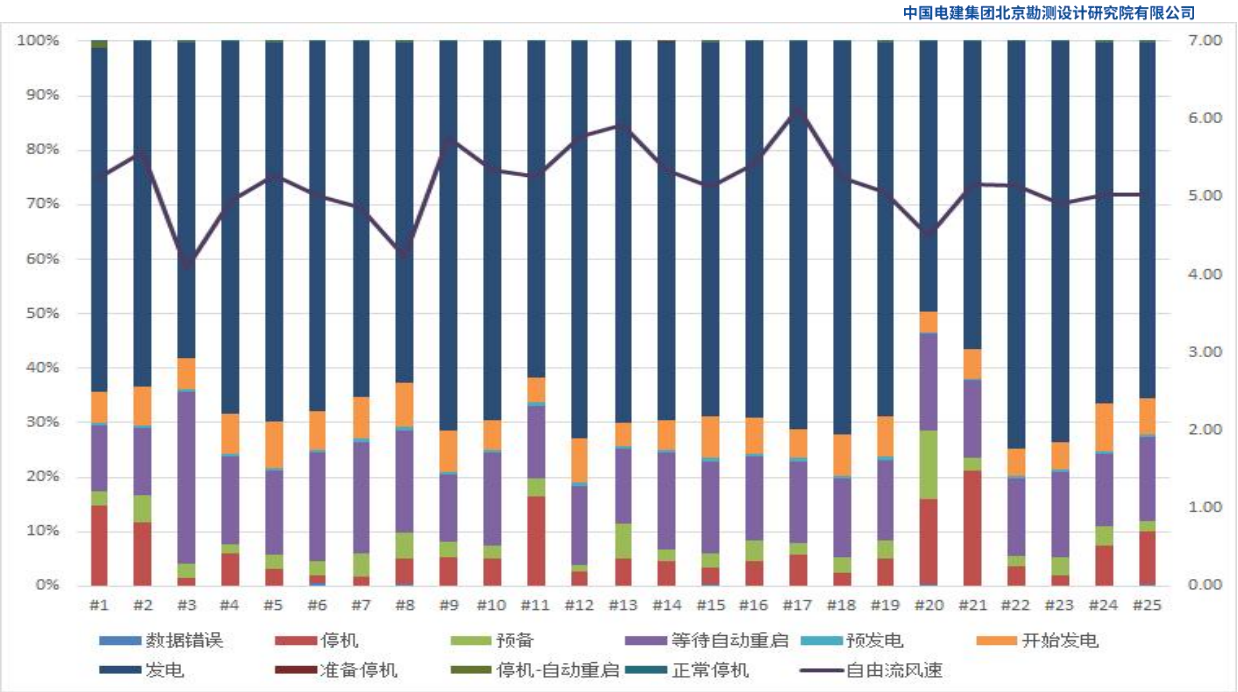
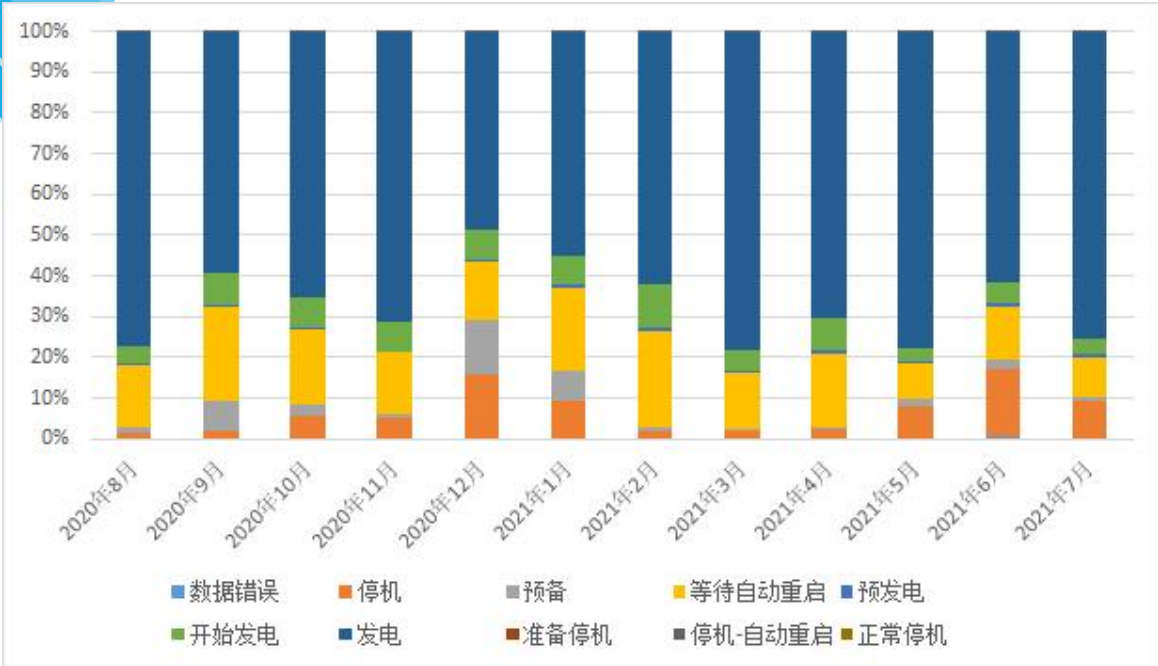
3.1项目研究成果

功率曲线



3.1项目研究成果

机组状态时间分布

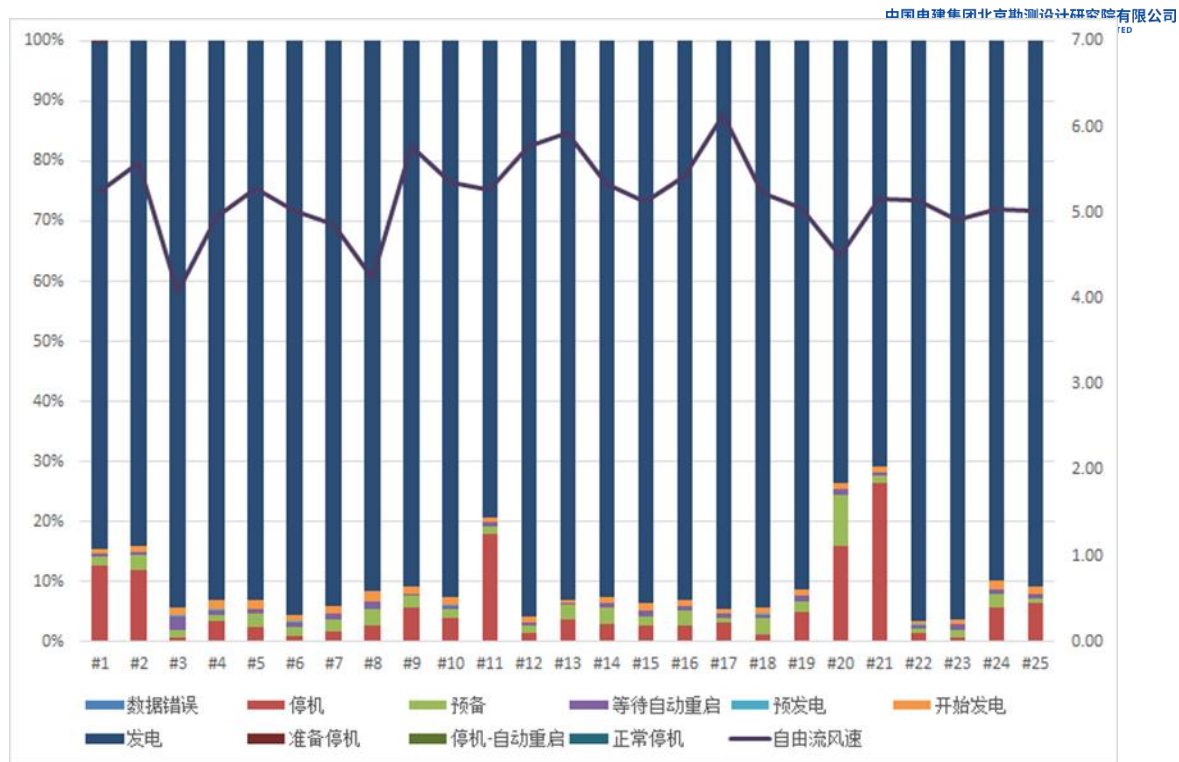
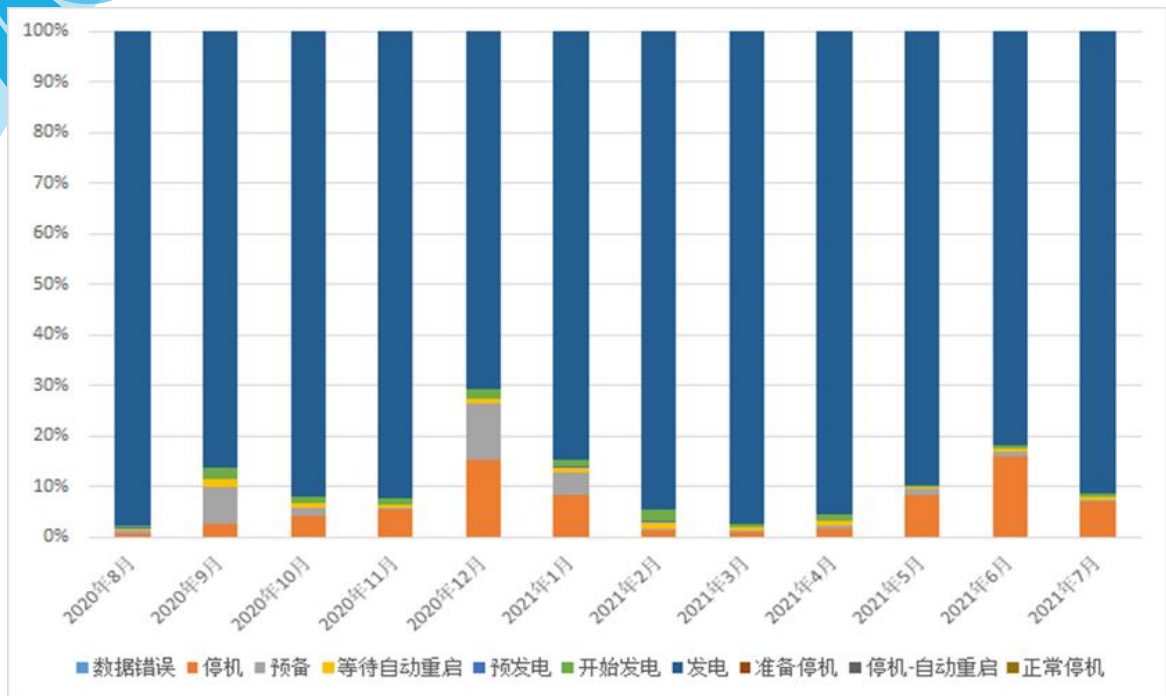


从全年来看，全场年并网运行时间5480h，时间占比较高的状态分别为“发电状态”占比66.8%、等待自动重启状态占比16.1%、停机状态占比6.6%、开始发电状态占比6.4%。

2020年9月、12月，2021年1月、6月并网运行时间占比低于60%，其中2020年12月并网运行时间占比最低仅48.6%，该月份停机状态、预备状态、等待自动重启状态及开始发电状态时间占比均较高。非并网运行状态中等待自动重启状态和开始发电状态在各月份均有一定时间占比，停机状态和预备状态则在2020年12月，2021年1月、6月、7月等月份时间占比较高，其余月份时间占比不高。需要特别关注的是#3、#20、#21，非并网运行状态时间占比均超过40%。

3.1项目研究成果

机组状态能量分布



从全年能量占比较高的状态分别为发电状态占比90.4%。全场停机状态和预备状态损失等效满发小时数达到120h、41h。

从各月份来看，每个月能量占比高的状态同样为上述三种，其中2020年9月、12月，2021年1月、5月、6月损失电量超过10%，尤其2020年12月损失电量最高，停机状态和预备状态能量占比分别达到15.4%、10.8%。

需要特别关注的是#1、#2、#11、#20、#21，非并网运行状态能量占比均超过15%，主要贡献来自于停机状态，每台的停机状态损失等效满发小时数均超过250h，分别达到253h、263h、403h、283h、547h。#20损失贡献还来自预备2，其损失等效满发小时数为148h。

3.1项目研究成果

机组能量可利用率



全场平均的能量可利用率为90.3%，其中低于85%的有5台，分别为#1、#2、#11、#20、#21，最低的是#21仅70.9%。主要原因均为4.3.3所述停机1和预备2能量损失明显高于其他机组。

3.1项目研究成果

发电量对比分析



评估年全场平均自由流风速为5.18m/s，全场平均机组等效满发小时数为1890h。机组之间差异较大，2300h以上的有4台分别是#10、#12、#13、#17。其中1500h以下的有4台分别为#3、#8、#20、#21，其中#3和#8判断为局部地形导致的风资源较差，#20和#21为更换高强度连接螺栓致长时间停机。

风场	单位	湖南汝城SOMW风电场		
机型	-	105/2000		
轮毂高度	m	80		
台数	台	25		
容量	MW	50		
方案		初设阶段 (105/2000)	评估年运行 电量	未来20年 平均电量
平均风速	m/s	5.91	5.18	5.34
理论发电量	万kWh	13005	10447.91	10770.86
折减系数	%	75.1	90.4	90.4
实际机组发电量	万kWh	9771	9447.85	9739.89
等效满发小时数	h	1954	1889.57	1947.98

3.1项目研究成果

1、资源评估

(1) 风电场项目场址区内7073#测风塔70m高度年平均风速为6.14m/s，相邻#17机组80m高度自由流风速6.14m/s，年平均风功率密度为224.01W/m²。风电场风功率密度等级为1级，具备一定的开发潜力。

(2) SCADA秒级数据存在异常，剔除后对评估结论基本无影响：发电机转速有负值、风机发电量十位起记录个位不记录、部分数据缺失。应对发电机转速负值、风机发电量十位起记录个位不记录进行相应整改。

3.2东岗岭项目研究成果

2、机组运行情况

2.1功率曲线

(1) 测试#16机组经过自由流校正后的功率曲线和 C_p 曲线可信度明显提升， C_p 最大值由校正前0.617降低至0.467。评估年功率曲线符合度为99.7%，其中10m/s~11m/s风速段#16功率曲线低于合同要求，建议对风机相应风速区间的控制策略进行优化。

(2) 全场25台机组在额定转速至满发段（8m/s~11m/s）均存在功率非最优的特征，与#16测试机组一致，建议对风机相应风速区间的控制策略进行优化。

(3) 全场25台机组平均功率曲线符合度为94.6%，符合度较低。低于合同要求单台功率曲线符合度达到95%的有13台，具体为#1、#3、#4、#6、#7、#8、#10、#11、#14、#17、#18、#22、#23，最低的为10#机组仅88.3%，建议采取增加叶片气动附件、场群智能控制、尾流控制优化等措施进行功率曲线优化。

(4) 另外数据分析过程中发现机组的机舱风速仪测量准确度差，未进行NTF校正的全场平均功率曲线符合度达到109.6%，最高甚至达到142.4%，建议要求主机厂商对机舱风速仪进行更换并提供符合测量精度要求的设备。

3.2东岗岭项目研究成果

2.2发电情况

(1) 评估年全场平均自由流风速为5.18m/s，全场平均机组等效满发小时数为1890h。机组之间差异较大，等效满发小时数2300h以上的有4台，分别是#10、#12、#13、#17；等效满发小时数1500h以下的有4台，分别为#3、#8、#20、#21，其中#3和#8判断为局部地形导致的风资源较差，#20和#21为更换高强度连接螺栓导致长时间停机。

2.3月度特征

(1) 从全年来看，全场年并网运行时间5480h，时间占比和能量占比分别为66.8%、90.4%。非并网运行状态中等待自动重启状态时间占比最高，但能量占比不高。全场停机状态和预备状态损失等效满发小时数达到120h、41h，建议对冷却系统、偏航系统和变频器进行技改优化，降低故障频次，提升机组运行稳定性。

(2) 从各月份来看，2020年9月、12月，2021年1月、6月非并网运行时间占比和损失电量占比均较高，分别达到40%以上和10%以上。其中重点关注2020年12月，非并网运行时间占比和损失电量占比均最高，分别达到51.4%和29.1%，时间占比方面12月停机状态、预备状态、等待自动重启状态及开始发电状态时间占比均较高，能量占比方面停机状态和预备状态能量占比分别达到15.4%、10.8%，建议对冷却系统、偏航系统和变频器进行技改优化，降低故障频次，提升机组运行稳定性。

3.2东岗岭项目研究成果

2.3单台特征

(1) 从单台时间分布来看，需要特别关注的是#3、#20、#21，非并网运行状态时间占比均超过40%。其中#3主要源于等待自动重启状态，主要原因为局部地形导致的风资源较差；#20、#21主要源于停机状态和等待自动重启状态，主要原因为更换高强度连接螺栓导致长时间停机。

(2) 从单台能量分布来看，需要特别关注的是#1、#2、#11、#20、#21，非并网运行状态能量占比均超过15%，主要损失来自于停机状态，每台的停机状态损失等效满发小时数均超过250h，分别达到253h、263h、403h、283h、547h。#20损失电量还来自预备状态，其损失等效满发小时数为148h。

(3) 全场平均的能量可利用率为90.3%，其中低于85%的有5台，分别为#1、#2、#11、#20、#21，最低的是#21仅70.9%。主要原因均为4.3.3所述停机状态和预备状态能量损失明显高于其他机组。

3.2东岗岭项目研究成果

3、控制系统

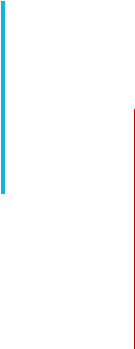
(1) 全场25台机组额定转速设定值不随月度变化，机组之间额定转速设定值差异不大，分布于15.1~15.3rpm，全场平均值为15.3rpm。全场25台机组额定转速设定值正常。

(2) #1、#4、#8、#13、#23、#25共计6台机组加速度幅值超过 1.5m/s^2 ，存在一定的安全性风险需给予关注。#2、#4、#9、#11、#12、#13、#14、#18、#21、#24共计10台机组加速度传感器零值出现偏差，建议核查PLC中加速度传感器信号处理程序或检测加速度传感器。

(3) 全场桨角均表现出两种特征：一是限功率主动桨角控制，二是桨角控制策略调整。建议SCADA系统中做好主动限功率的数据标识和记录，桨角控制策略建议主机厂商进行优化。桨角控制策略调整时间为2021/04/07左右，该调整一方面导致满发推迟（风速达到额定但未满发），另一方面导致额定转速至满发段功率非最优，最终导致月度性能2021年4月后明显弱于4月前。

(4) 全场25台机组最大桨角差异均在 1° 以下，各叶片相对平衡。

(5) 全场转速转矩散点除主动限功率外，其他转矩控制均正常。

Two vertical lines, one blue and one red, are positioned to the left of the section header.

第四部分：创新点与结论

A decorative wavy background at the bottom of the slide, featuring a red base with a green wave on top and an orange-to-red gradient on the left side.

PART 04

5.1创新点

- 1 激光雷达实地测风与前期测风塔、风功率预测塔、机舱风速仪、AWS中尺度多维度校验风能资源
- 2 基于运行风电场机组实际海量秒级运行数据
- 3 基于研发的数据处理分析平台
- 4 集成大数据技术，打造在建风场大数据应用生态圈并提炼了数据资产价值

5.2结语

结语：

本项目通过数字化的加持，解决了海量秒级数据的处理分析，能多维度评估风电场运行状态，形成一套可复制易操作的应用系统。为风电企业智慧转型及产业升级提供有力支撑。





中国电建
POWERCHINA

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司
BEIJING ENGINEERING CORPORATION LIMITED

创新 担当 务实 共赢

谢谢大家

<http://www.bhidi.com>