

# 竹-环氧复合材料叶片 的研发与产业化

江苏风力机设计高技术重点实验室  
无锡天奇竹风科技有限公司

# 主要内容

- 1, 竹-环氧复合材料叶片的研发背景
  - 背景信息, 叶片的常用材料, 存在问题
- 2, 竹-环氧复合材料的特点
  - 技术优势, 产品特点
- 3, 竹-环氧复合材料叶片的开发过程
  - 研发投入, 研发过程, 关键难题
- 4, 竹-环氧复合材料叶片的产业化进展
  - 开发过程,
- 5, 展望未来
  - 未来研发内容, 可能的进展

# 1, 竹-环氧复合材料叶片的研发背景

## 1.1 风电产业崛起

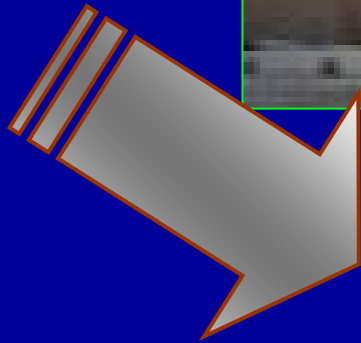


# 零部件——整机——产业基地快速发展





兴



衰

# 1.2 叶片的常用材料

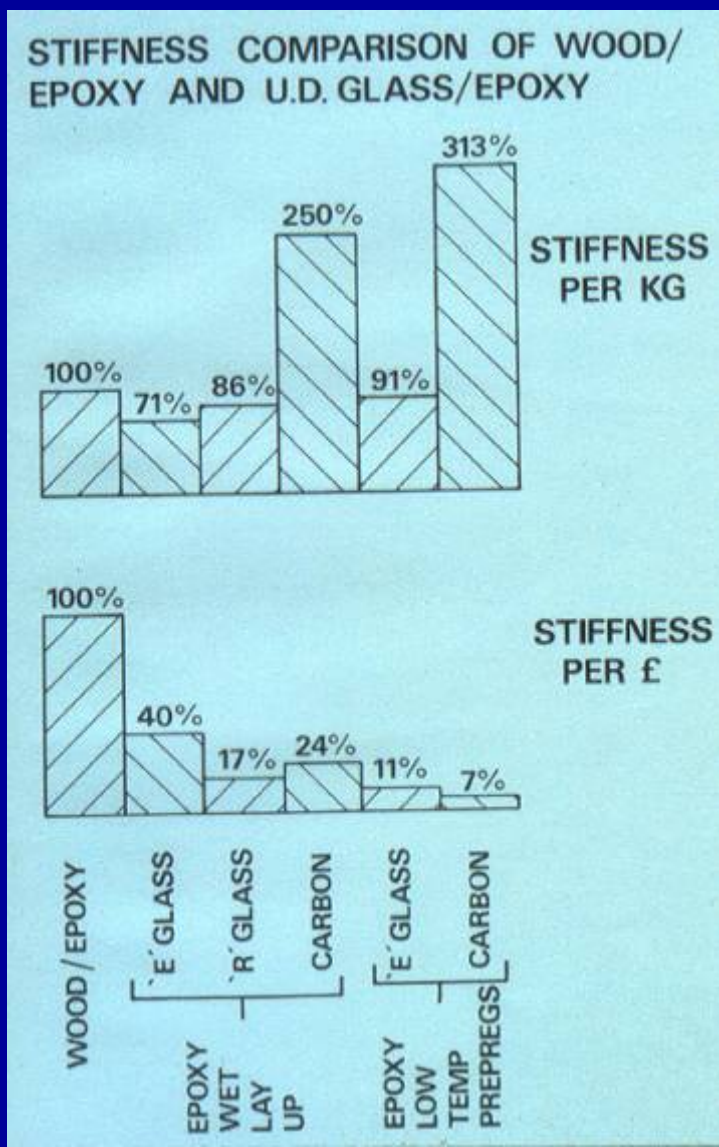
At the time this document was drawn up full-scale tests were carried out on blades of horizontal axis wind turbines. The blades were mostly made of fibre reinforced plastics and wood/epoxy. However, most principles would be applicable to any WTGS configuration, size and material.

- 根据IEC 61400-23 标准的说明, 大型水平轴风力发电机的叶片主要分为两种:
- 纤维增强塑料
  - 玻璃钢
    - 玻璃钢-不饱和聚酯
    - 玻璃钢-环氧
  - 碳-环氧
- 木-环氧

# 1.3 主要问题

- 不同的材料有不同的特点, 存在不同的问题
- 玻璃钢
  - 难以降解, 回收困难
  - 性能对工艺依赖性大
- 碳纤维:
  - 价格高, 性价比差
- 木-环氧:
  - 目前主要是用芬兰桦木(Finnish Birch), 中国缺少实施条件, 且该技术为Vestas专有

# 1.4 新材料的研发动力



- 航空工业采用比强度，比刚度等概念，均是在强调以性能与重量的比值
- 风电行业更关注性能与成本的比值。

# 化学元素第IV族

	碳C	Si-C	硅Si
原子序数	6		
原子量	12		
原子半径			
化学键能	C-C	Si-C	Si-Si
与O键能	C-O		Si-O

# 碳的利用形态1—碳纤维

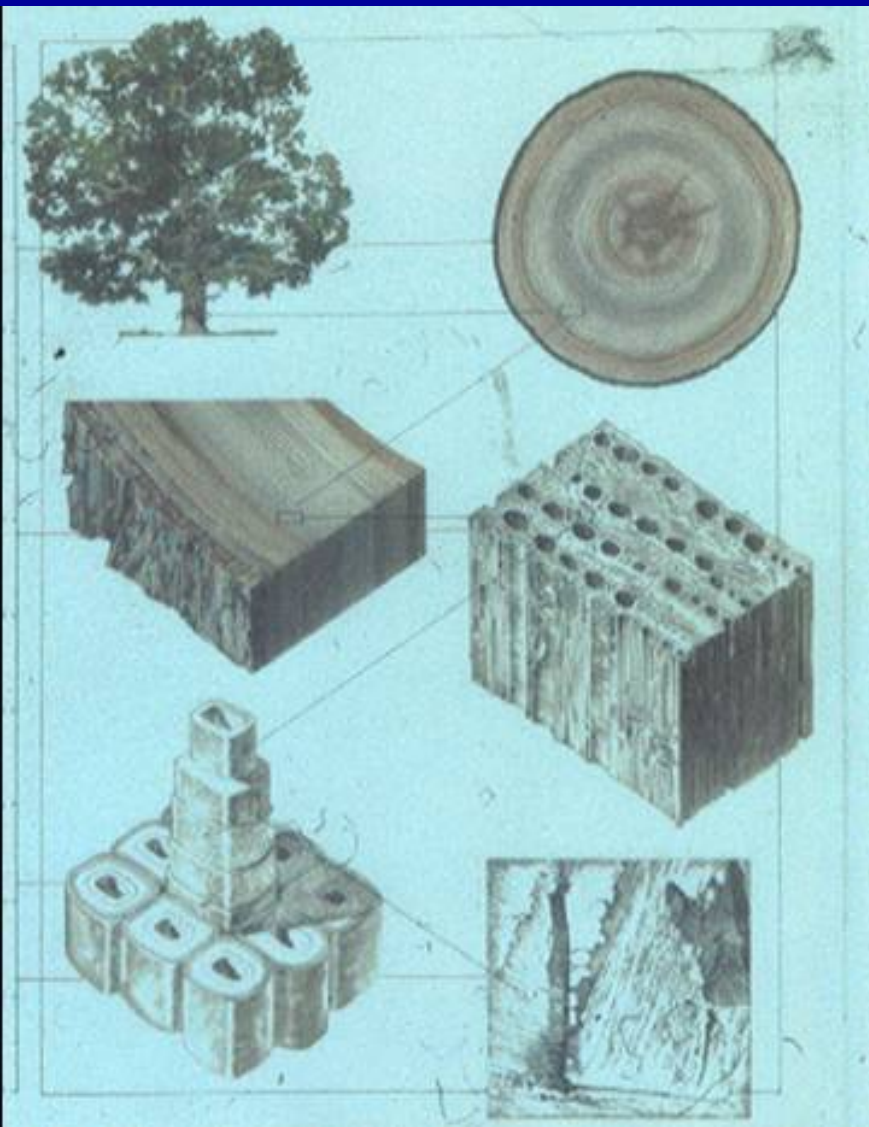
高耗能

以单位质量

高刚度

高

# 碳的存在形态2--木材



在尺度上,

- 世界最高的树木达156米
- 在我国, 东北原始森林中的红松, 可以长到50米高, 粗1.5米左右, 与同尺寸叶片相当
- 是一种天然的复合材料, 在自然选择的作用下, 具有平衡的密度/刚度/强度.
- 应用最长远

# 碳的利用形态3—竹材

## 与木材相比

- 更高的强度
- 更高的刚度
- 更快的生长速度
- 中国优势资源
- 性能的可设计性

## 与碳纤维相比

- 极低的成本
- 极低的能耗
- 制作工艺简单
- 资源丰富

# 1.4 项目开发

## 国内外广泛合作，共同开发新技术

- ❖ 通过国际合作, 引进来自英国剑桥大学的竹制复合材料叶片技术
- ❖ 天奇股份
- ❖ 无锡瑞尔竹风科技有限公司——风力机叶片制造商
- ❖ 与大庄地板合作开发竹层积材
- ❖ 与南京航空航天大学开展叶片设计的合作

# 产学研合作，创新发展风电产业



- ❖ 南京航空航天大学主持的**2项风力发电973项目**
  - “大型风力机的空气动力学基础研究”
  - “大规模非并网风电系统的基础研究”

## 2, 竹-环氧复合材料的特点

### ❖ 竹材资源丰富

全球的竹林面积**2200**万公顷，每年生产的各类竹材**1500-2000**万吨。

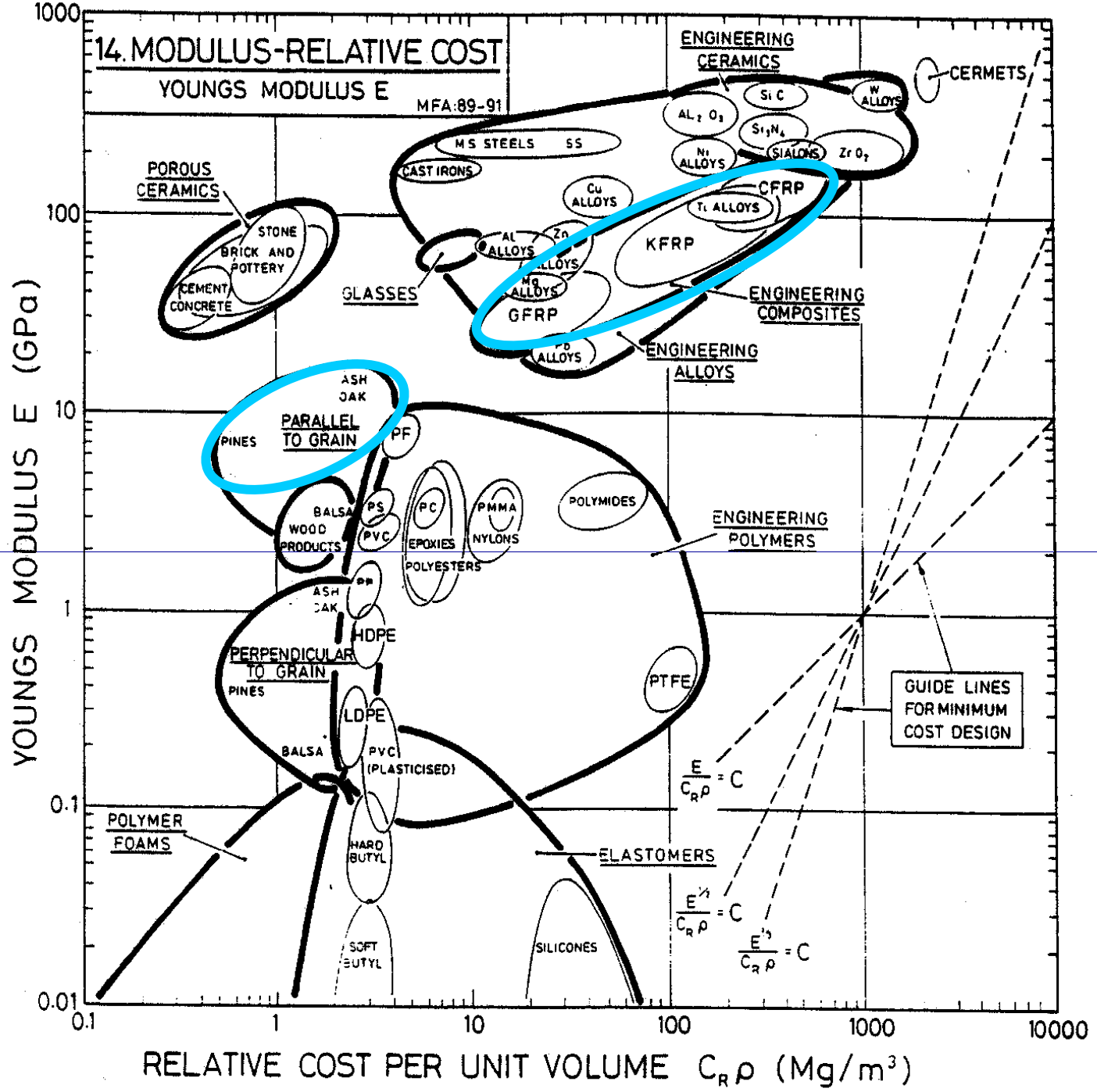
中国竹林面积**800**万公顷，占世界竹林面积的**40%**。江西、湖南、浙江、福建、广东、四川、广西、安徽等**8**个省区，竹林面积占全国总面积的**88%**。

# 新型风力机叶片材料——竹材

## ❖竹材优势——生长速度快

竹子是生长最快的植物之一，成熟砍伐期为4-6年。而木材需要8-10年。与木材相比，竹材具有更高的经济价值和环保价值。





# 节能

Material	Energy (GJ/m <sup>3</sup> )	Stiffness (Gpa)	Strength (Mpa)	Energy/ Stiffness (J/Nm)	Energy/ Strength (kJ/Nm)
<b>Aluminium</b> (Extrusions)	800	70	300	11.4	2.67
<b>Steel</b> (Grade 43 sections)	500	210	275	2.4	1.82
<b>GRP</b> (UD Glass/Polyester)	250	40	300	6.3	0.83
<b>CFRP</b> (UD carbon/Epoxy)	500	125	900	4.0	0.56
<b>Wood</b> (Finnish Birch)	3.8	16	80	0.24	0.048
<b>Bamboo</b>	3.8	25	120	0.15	0.032

# [环保]材料回收

- 循环经济：竹材可降解，易于回收
- 是一种天然的碳封存的方式

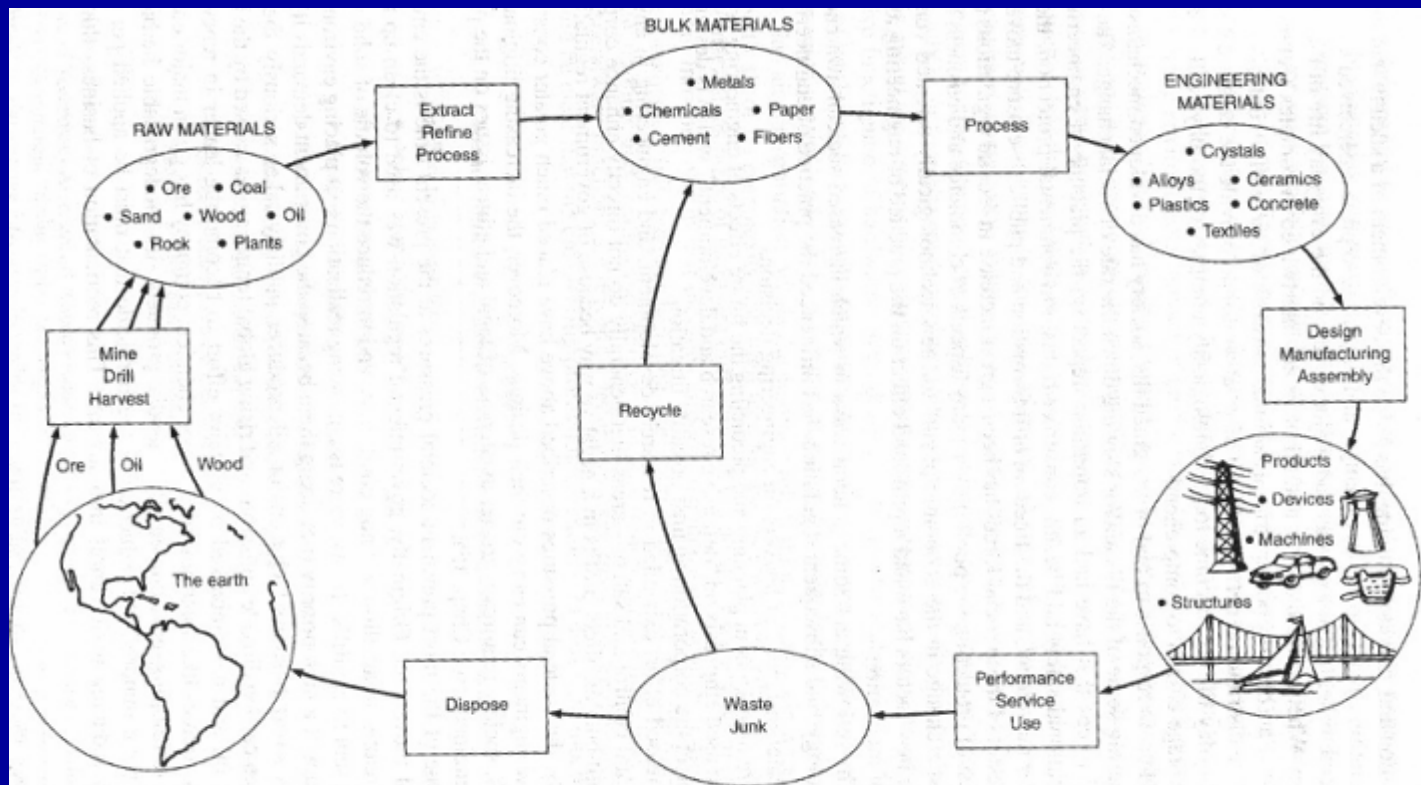


FIGURE 1.15

The total materials cycle. (Reproduced from "Materials and Man's Needs," National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1974.)

## 三 研制主要工作和关键技术

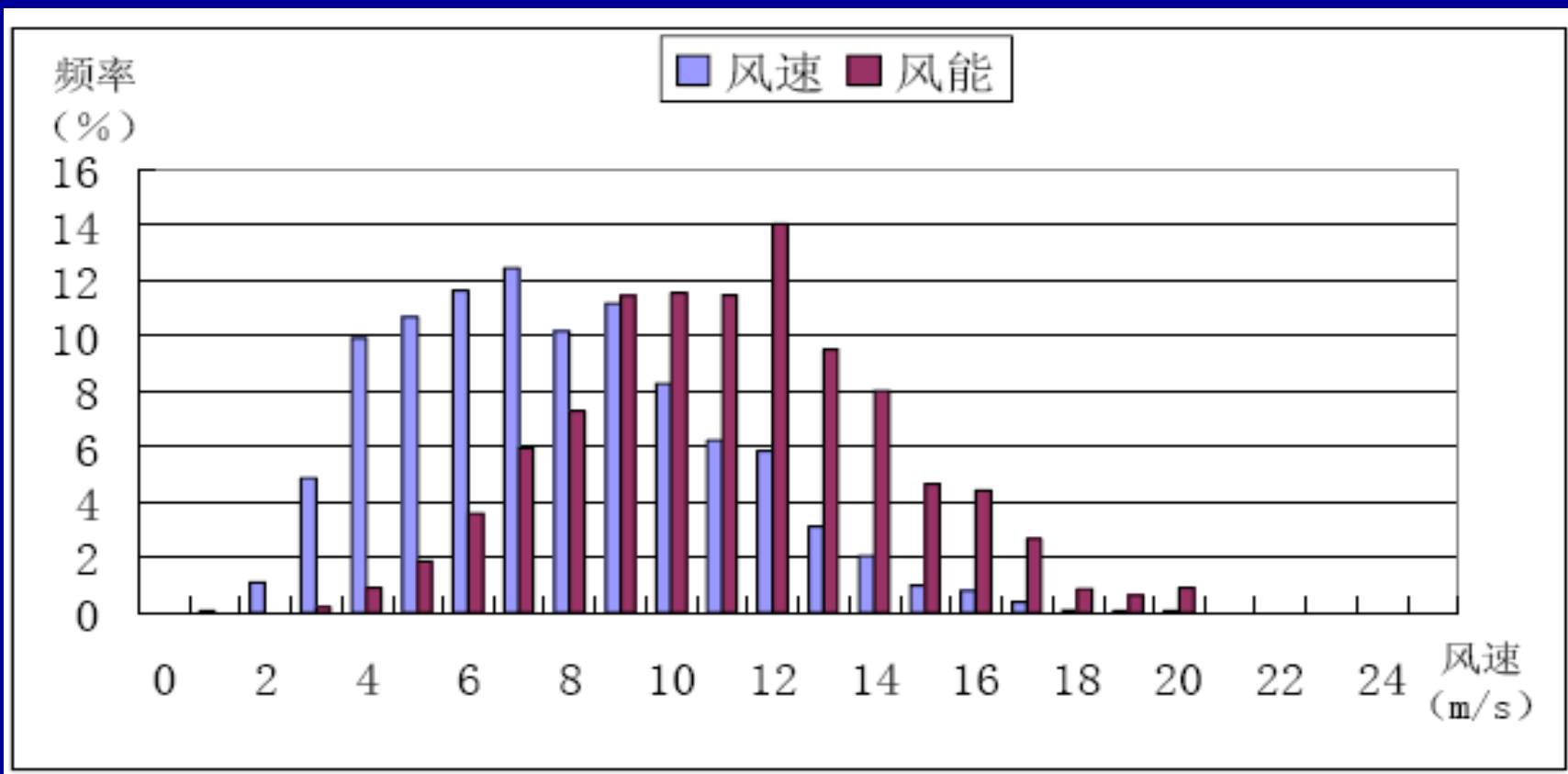
- ❖ 开展叶片气动外形优化设计方法研究，形成风力发电机组叶片自主设计能力；
- ❖ 研发竹质复合材料叶片结构；
- ❖ 研发竹质复合材料叶片灌注工艺与装备；
- ❖ 研制叶片测试设备。

## 3.1 叶片气动外形优化设计方法研究

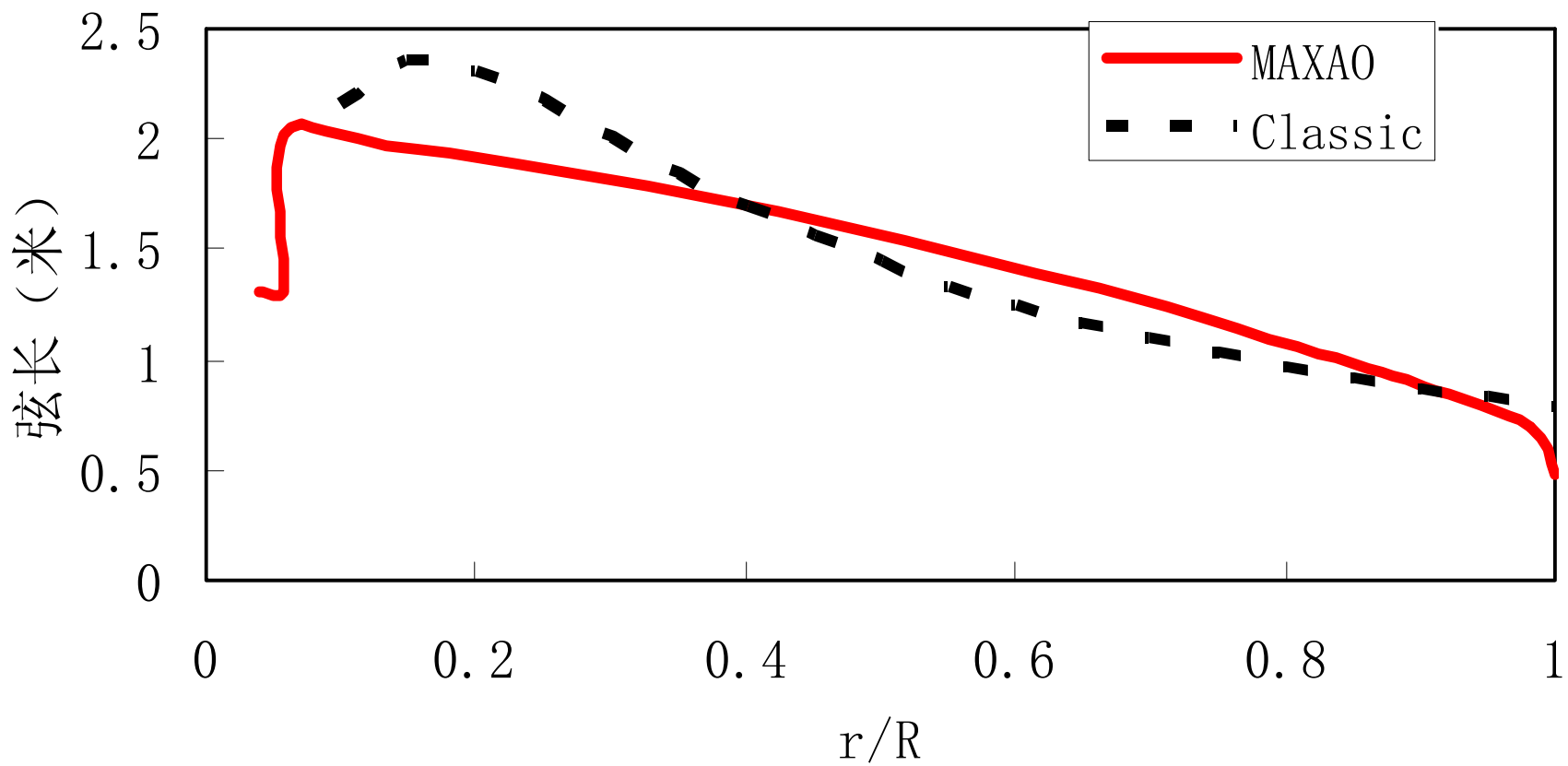
❖ 优化目标：年发电量最大

❖ 设计方法：MAXAO

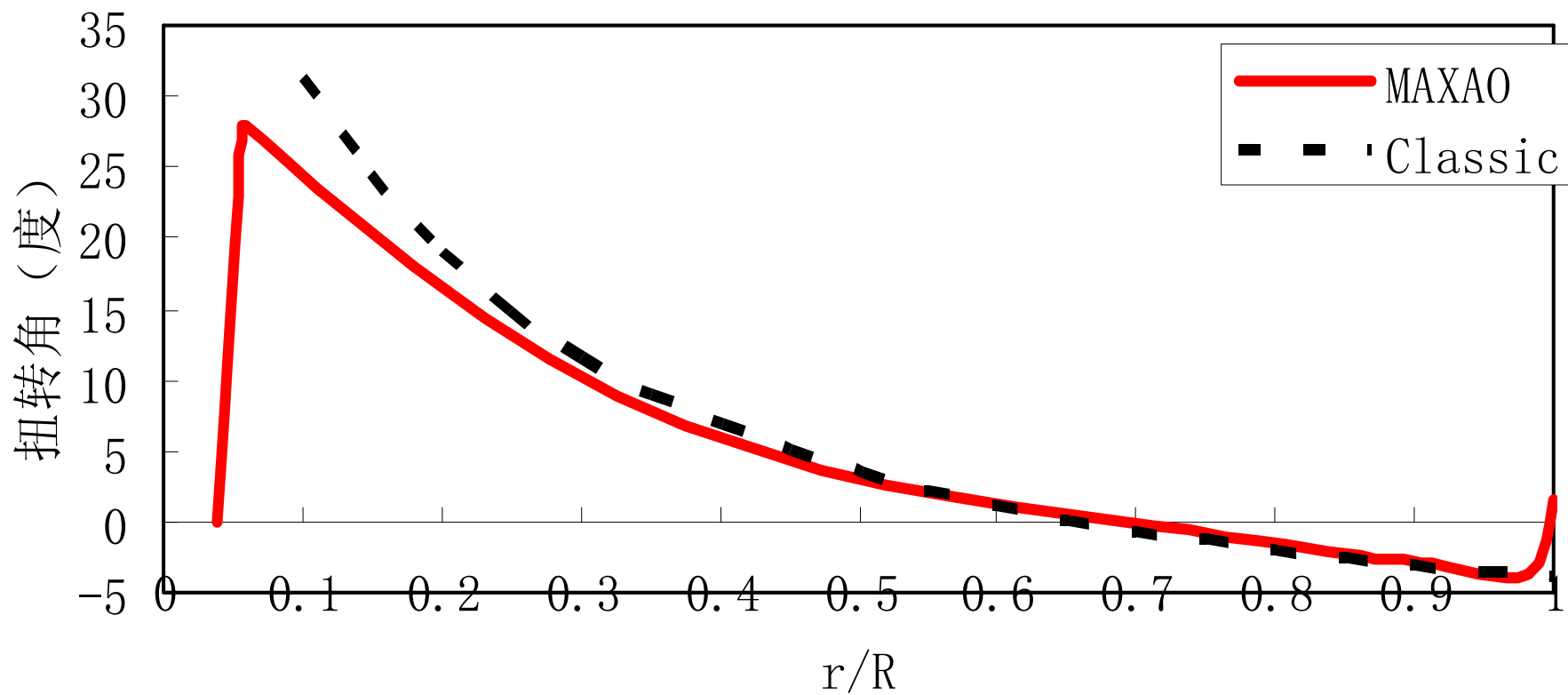
- 概率分布函数或风场实测分布
- 迭代求解非线性方程（尖速比函数）
- 加权平均



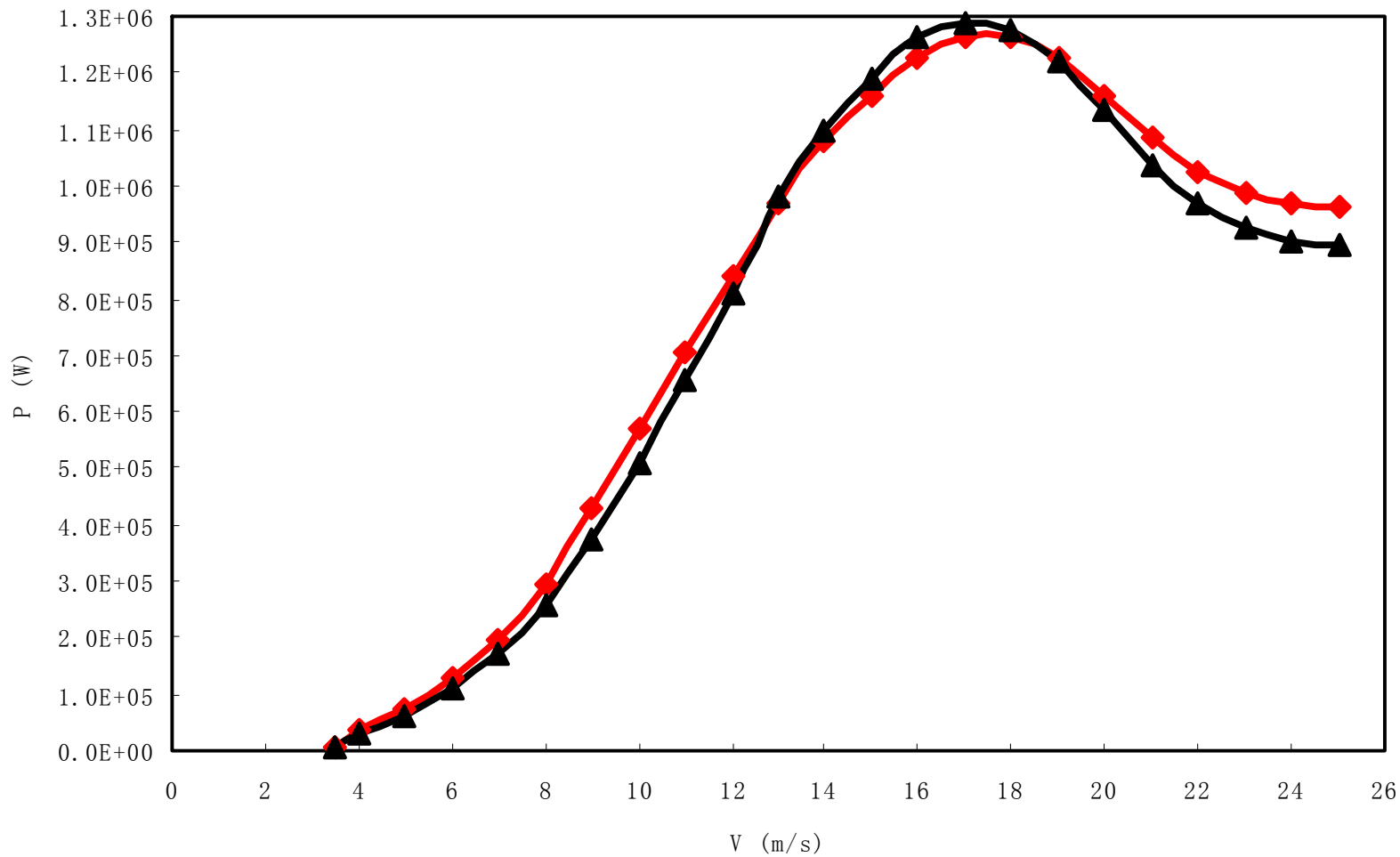
单晶河风电场65m高度处风速河风能频率分布



不同设计方法弦长分布



不同设计方法扭转角分布

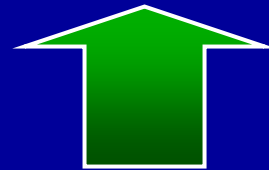


不同设计方法功率计算结果

# 年发电量比较

- MAXAO设计方法： $3.076 \times 10^6 \text{KWh}$
- 经典设计方法： $2.852 \times 10^6 \text{KWh}$

风能捕获： 8%



## 3.2 竹质复合材料基材开发

竹质复合材料基材性能指标	
比模量 ( <i>MOE</i> )	<b>&gt; 24 GPa</b>
比强度 ( <i>UCS</i> )	<b>&gt;100 MPa</b>
密度 ( <i>Density</i> )	<b>&lt;1200 kg/m<sup>3</sup></b>

# 技术难点

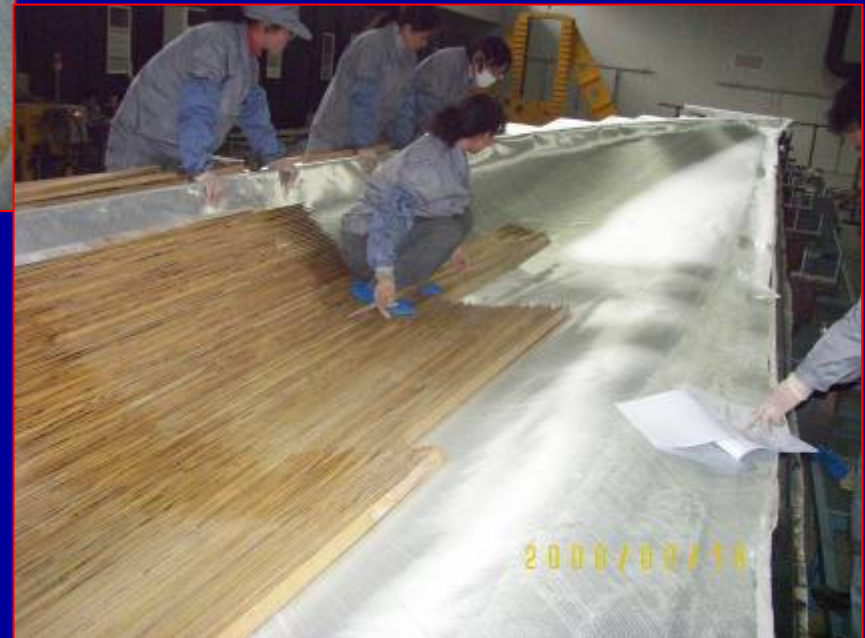
- 材料物理力学性能离散度很大；
- 选材标准缺乏；
- 竹材使用工艺复杂。

# 解决方案

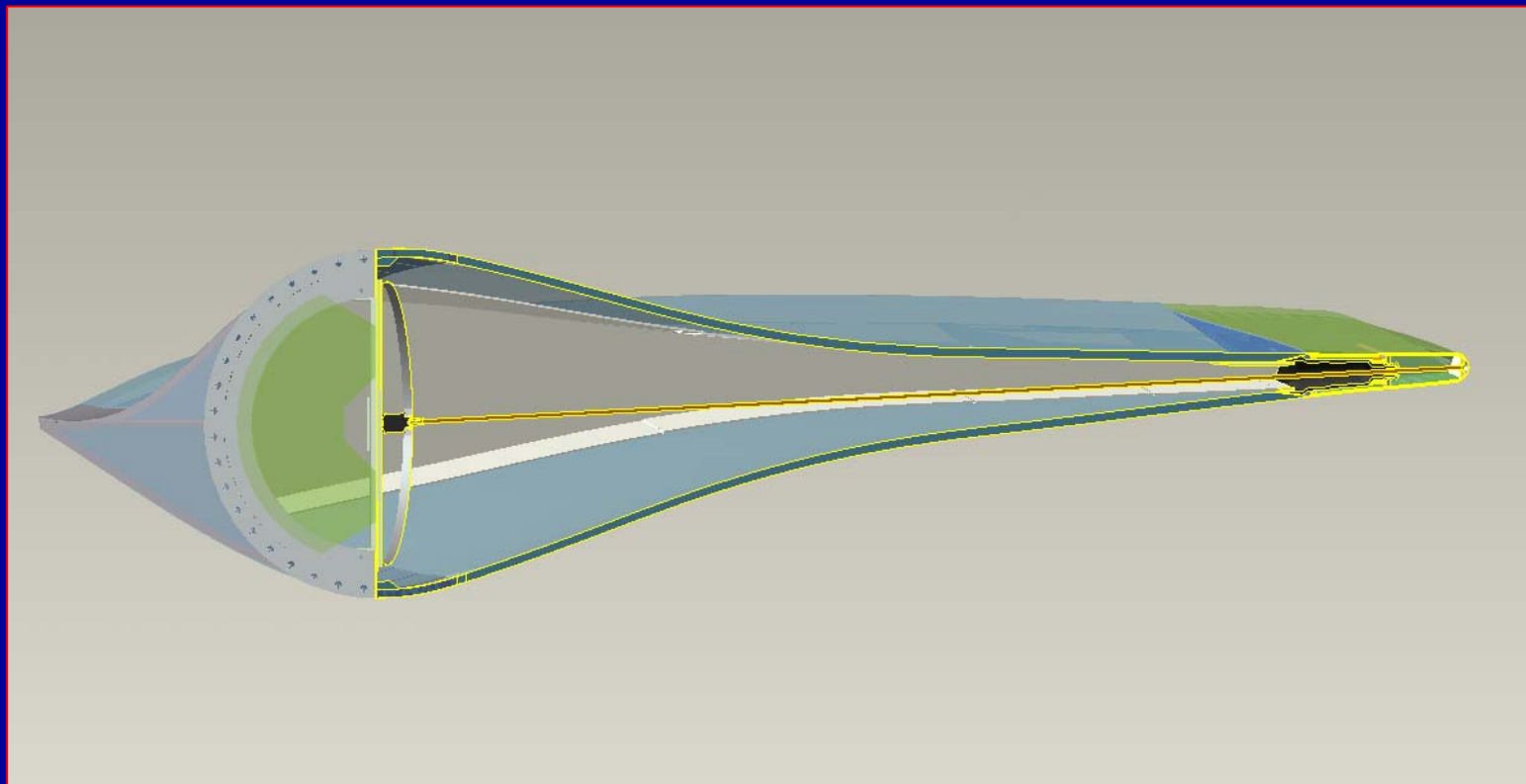
- ❖ 竹种、产地、竹龄、部位、厚度、宽度、含水率、热压温度、压力、组坯方式、胶粘剂种类、改性处理。
- ❖ 温湿度生产条件、仓储、运输。
- ❖ 原竹、竹片、成材的物理力学实验。
- ❖ 成材的疲劳性能试验。



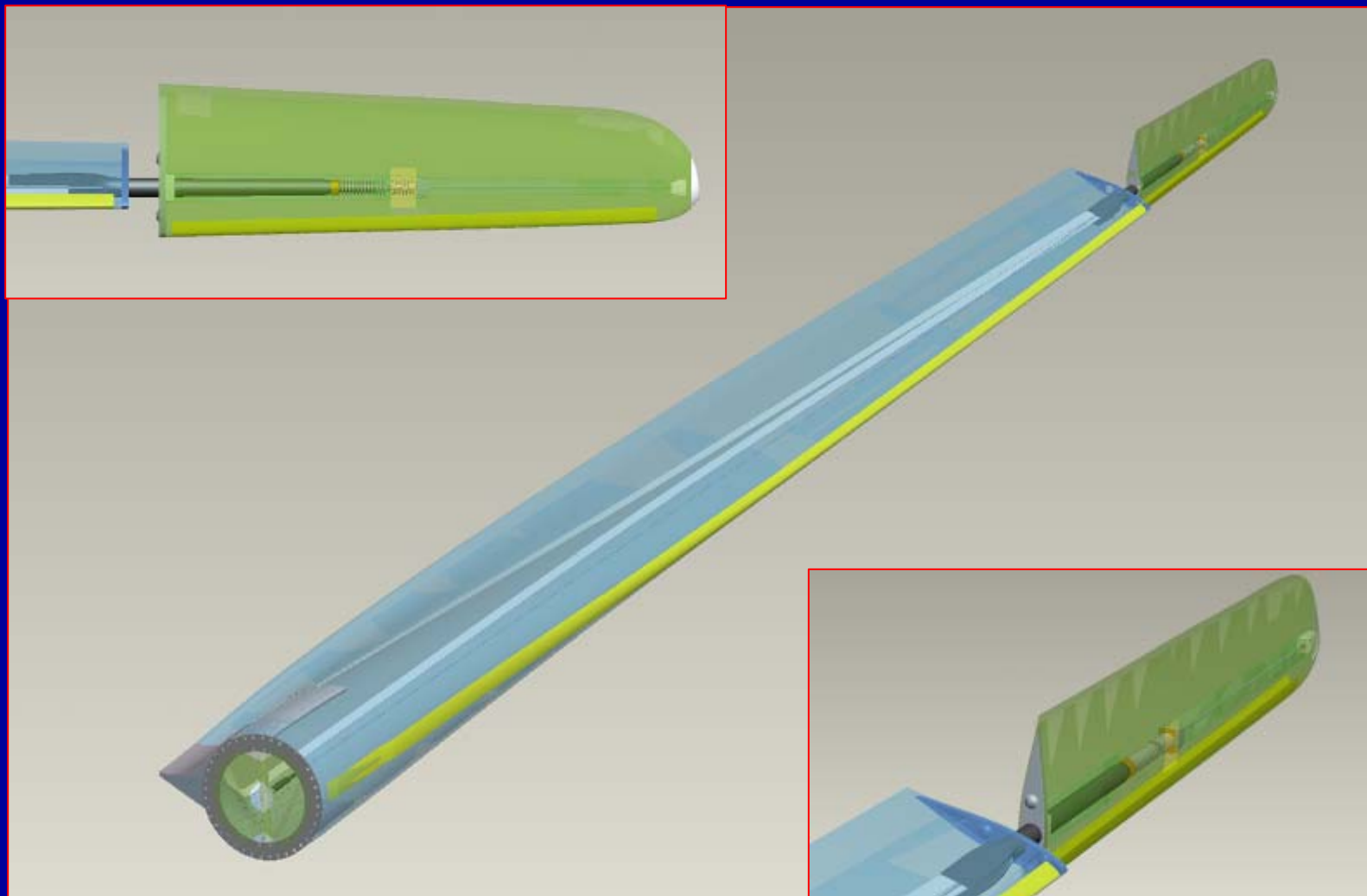
**MOE: 28GPa**  
**UCS: 140MPa**  
**Density: 1150 kg/m<sup>3</sup>**



### 3.3 竹质复合材料叶片结构



叶片主体结构



叶片刹车机构——刹车状态

## 3.4 竹质复合材料制造工艺开发

- 耐候问题



# ■ 叶根螺栓安装方式



# ■ 根部竹材扭曲—预成型工艺



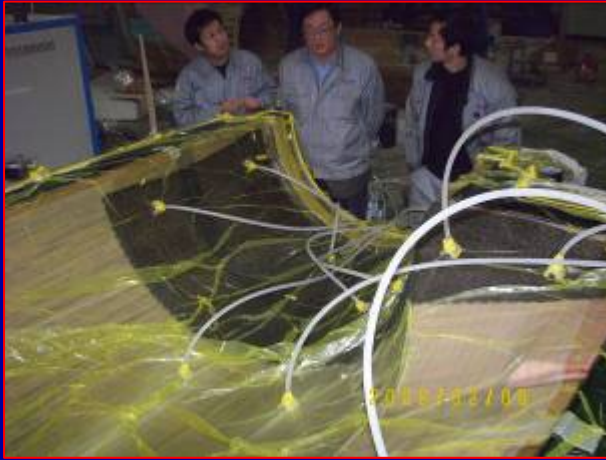
## ■ 叶片模具与翻转装置



## ■ 竹材连接工艺



# ■ 一次性真空灌注工艺





## 4.5 大尺度叶片测试设备



国外测试设备

## ■ 自行研制的叶片测试设备





## ■ 测试设备特点

- 结构稳固，外界干扰小，挠度测量准确
- 加载曲线更加光滑
- 集中载荷影响小
- 检测区域大，可以分段检测

## 4.6 竹质复合材料叶片测试结果

根据中国飞机强度研究所《风力叶片静强度试验总结及分析》，结论如下：

“此次测试叶片在达到设计载荷的**125%**发生破坏，根据**JB/T 10194-2000**标准要求，表明按照目前的结构设计、工艺和制造水平所生产的测试叶片，能够满足设计的强度要求。”

## 4.7 竹质复合材料叶片气动实验

目前正在在南京航空航天大学风气动验中心做叶片气动试验，为进一步优化设计打下基础。



## （四）应用情况

试制的竹质复合材料风力机叶片已经应用在浙江运达风力发电工程有限公司张北风场的风机上。



研制成功了世界首创的竹质复合材料风力机叶片，并成功应用在河北张北风场的风力机上。

经过近半年的运行表明，由于其质量比同等规模的玻璃钢风力机叶片轻**10%**，加上优化的设计，其年发电量高出**8%**。

已获单个近**1.0**亿元的订单。



# 技术创新点

- 提出并应用以年发电量最大为目标的叶片气动外形优化设计方法，拥有完全的风电叶片自主设计能力，实现了气动——结构——材料——工艺一体化设计；
- 采用竹质复合材料技术研制的风电叶片为世界首创，并拥有自主知识产权；具有重量轻、性价比高、绿色环保、可再生性好等特点；
- 独创的预成型和竹质复合材料真空灌注制造工艺技术，解决了竹质复合材料应用中竹材成形难、长度有限、材料间隙大等众多技术难点；
- 自主研发了风电叶片测试设备，可实现大尺度叶片测试，为风电叶片自主研制打下了技术基础。

# 5, 未来研发内容

- 竹材性能系列化
  - 超高性能竹层积材
  - 高性能竹层积材
  - 高性价比竹层积材
- 竹材性能标准化
  - 工艺改进与开发
  - 竹-环氧复合材料在其他行业的应用

**创新、创值、永远立于不败之地！**

谢谢各位领导、专家  
敬请提出宝贵意见

赵新华

[Robin.Xinhua.ZHAO@gmail.com](mailto:Robin.Xinhua.ZHAO@gmail.com)