

复合材料在风电叶片制造领域 的应用和未来发展

高国强

中材科技风电叶片股份有限公司

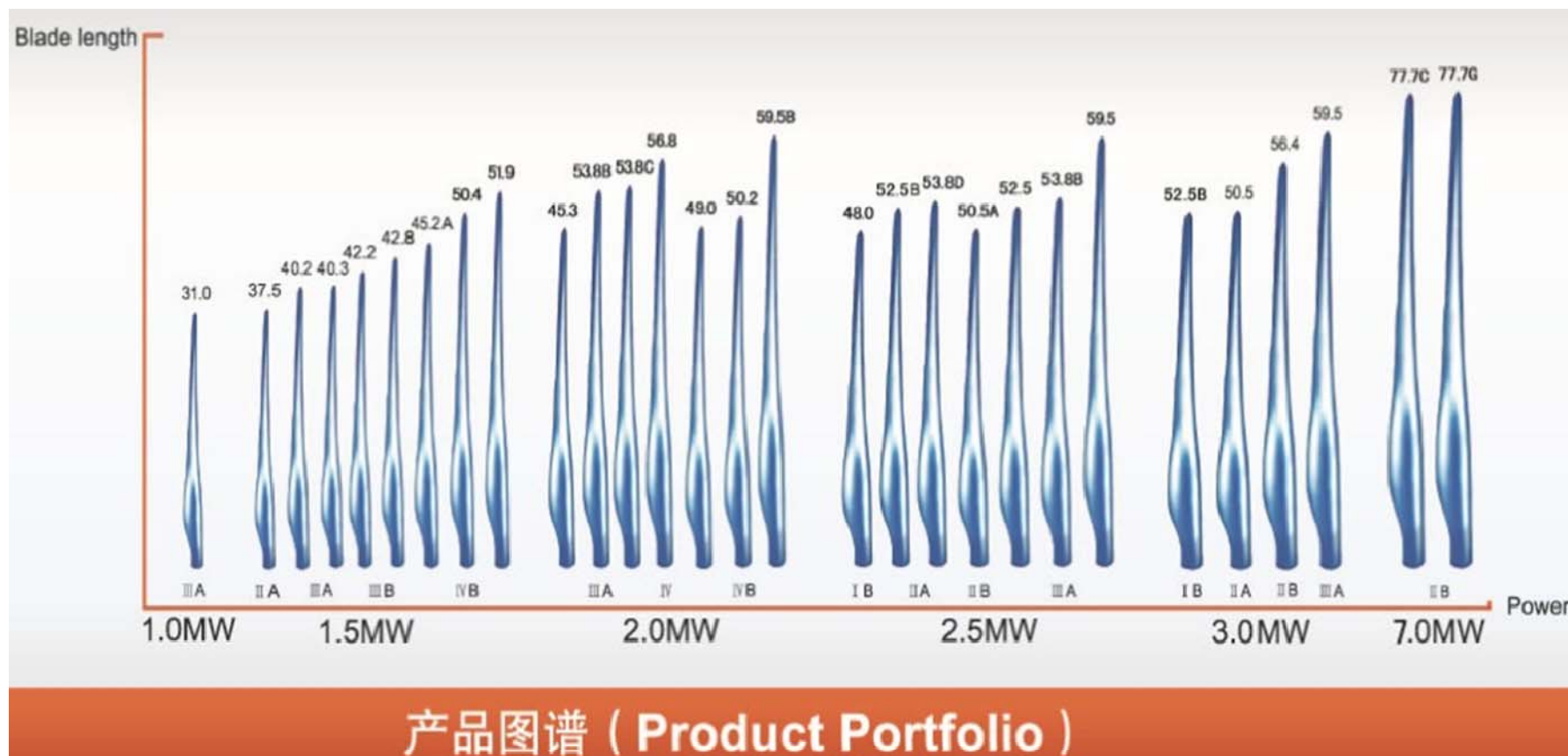
2015年7月

提 纲

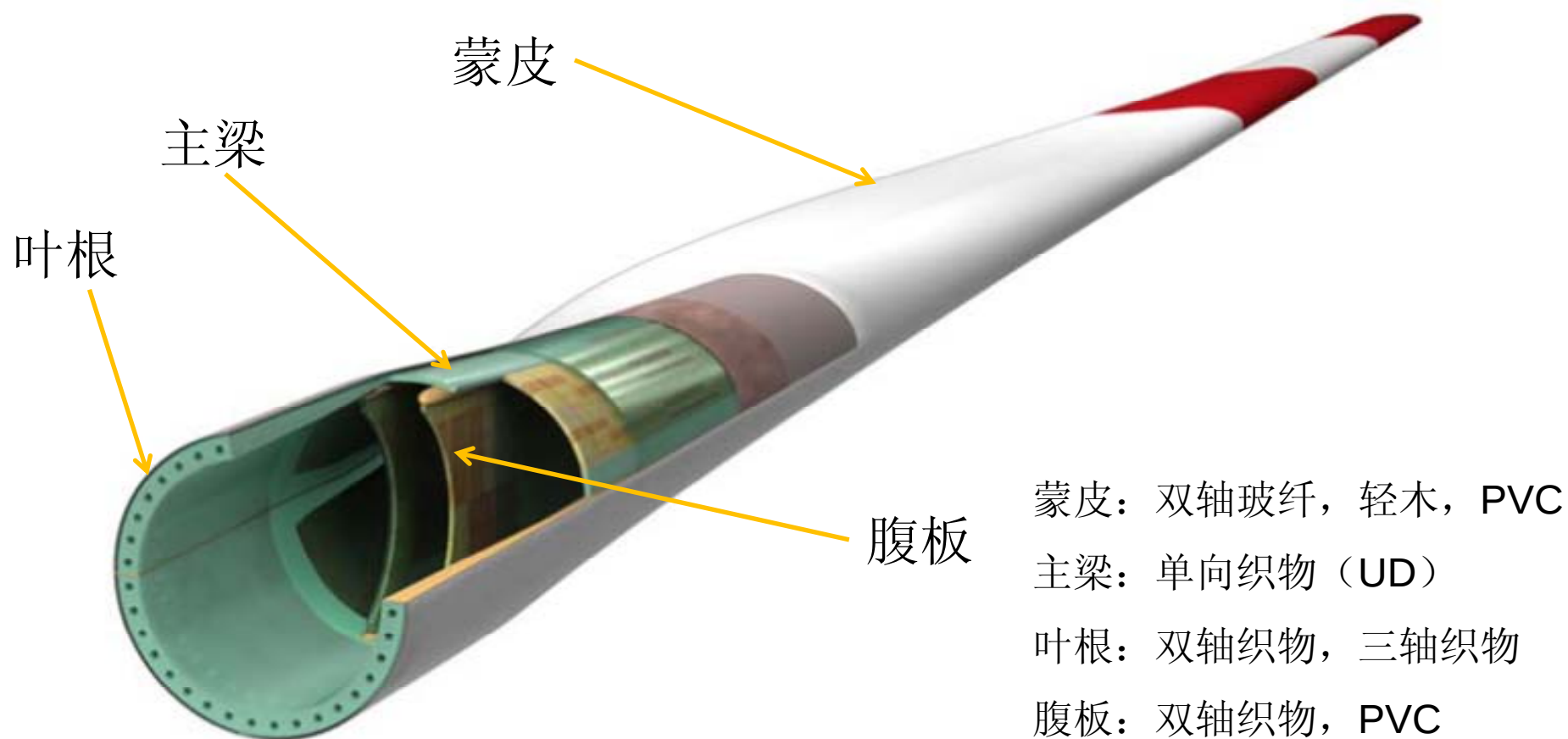
- 一、复合材料在风电叶片中的应用
- 二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构
- 三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

一、复合材料在风电叶片中的应用

复合材料叶片朝大型化、轻量化、高效率、低成本化方向发展



一、复合材料在风电叶片中的应用



大型风电叶片复合材料结构示意图

一、复合材料在风电叶片中的应用

大型风电叶片中使用的**5**种主要原材料

树脂基体：环氧树脂，乙烯基树脂

增强材料：玻璃纤维（E玻纤，高模玻纤），碳纤维

结构芯材：PVC，Balsa轻木

粘接胶：环氧粘接胶，聚氨酯粘接胶

涂料：聚氨酯涂料

一、复合材料在风电叶片中的应用

环氧树脂

具有良好的力学性能，耐化学腐蚀性能和尺寸稳定性，是目前大型风电叶片真空灌注成型首选树脂。

风电叶片真空灌注环氧树脂主要供应商：迈图、上纬、东汽

树脂混合后粘度： 300—400mPaS

典型树脂浇注体性能

检验项目	测试数据	检验项目	测试数据
拉伸强度MPa	74	弯曲强度MPa	108
拉伸模量GPa	3.06	弯曲模量GPa	3.09
冲击强度KJ/m ²	72.9	体积收缩率	5.11%

一、复合材料在风电叶片中的应用

E玻纤和高模玻纤

常用玻纤织物的结构形式包括：

单向织物

双轴织物

三轴织物

E玻纤和高模玻纤纤维自身材料性能列表

	E玻纤测试数据	高模玻纤测试数据
拉伸强度MPa	2465	2696
拉伸模量GPa	83	91.58
拉伸应变		3.12%

一、复合材料在风电叶片中的应用

真空灌注工艺玻纤增强环氧树脂复合材料性能对比

		E玻纤测试数据	高模玻纤测试数据
单向 织物	拉伸强度MPa	949	1168
	拉伸模量GPa	43.5	46.34
	弯曲强度MPa	977	
	弯曲模量GPa	34.1	

一、复合材料在风电叶片中的应用

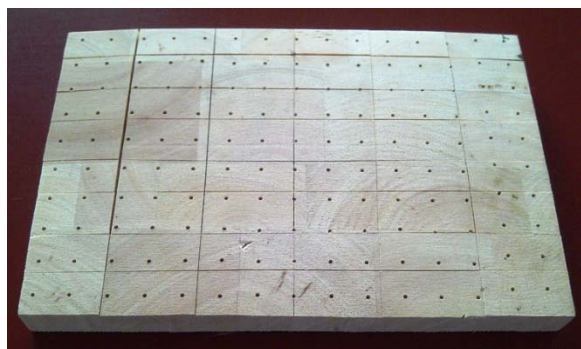
真空灌注工艺玻纤增强环氧树脂复合材料性能对比

		0度方向测试数据	45度方向测试数据
双 轴 织 物	拉伸强度MPa	101	577
	拉伸模量GPa	13.2	27.0
	压缩强度MPa	114	446
	压缩模量GPa	12.2	28.8
	断裂延伸率	6.75	2.61

试样玻纤质量含量：72.3%（玻纤体积含量：54.4%）

一、复合材料在风电叶片中的应用

常用的结构泡沫



Balsa轻木



PVC



PET



HPE

对结构泡沫的技术要求：

- 抗压缩强度高；
- 吸胶量低；
- 热稳定性好；
- 需要有适宜树脂流动的沟槽、孔结构；
- 工艺切口，利于铺放时随型。

一、复合材料在风电叶片中的应用

Balsa轻木技术要求:

序号	测试项目	单位	值	测试方法及标准
1	标准密度	kg/m ³	150±22.5	ISO 845 (测整板样品: 1220*610mm)
2	压缩模量 E_{yc}	GPa	≥ 1	GB/T 8813-2008 ISO 844:2004
3	压缩模量 E_{yc} 和 E_{zc}	MPa	35-120	GB/T 8813-2008 ISO 844:2004
5	剪切模量 G_{xy} 和 G_{xz}	MPa	≥ 70	ISO 1922
	含水率	%	<12	—

Balsa轻木的缺点:

密度高; 天然生长, 生长过程产生的缺陷容易进入到产品中, 影响复合层质量。

一、复合材料在风电叶片中的应用

PVC结构泡沫技术要求

序号	材料	单位	标称值		标准
			PVC60	PVC80	
	剪切模量	MPa	≥ 15	≥ 23	ISO 1922
	剪切强度	MPa	≥ 0.6	≥ 0.90	ISO 1922
	压缩弹性模量	MPa	≥ 45	≥ 65	ISO 844
	压缩强度	MPa	≥ 0.65	≥ 1.0	ISO 844
	热稳定性（120℃等温30分钟，体积变形率）	(%)	≤5	≤5	

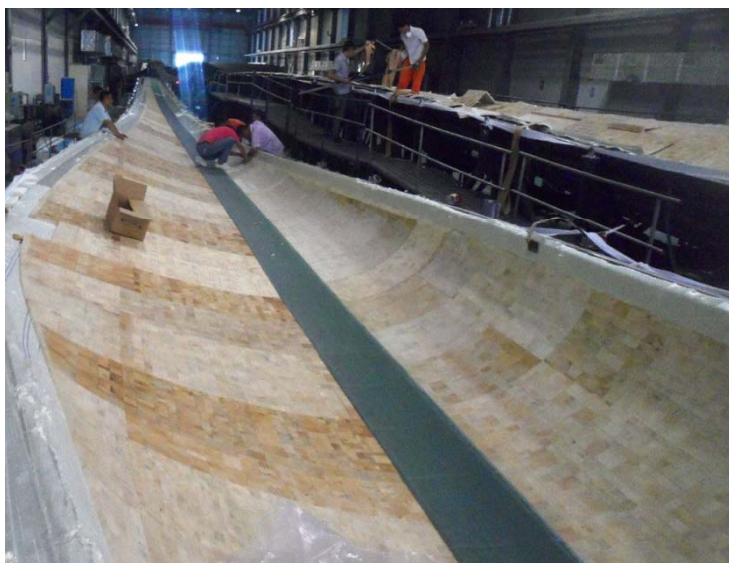
二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

用于大型风电叶片制造典型工艺路线：

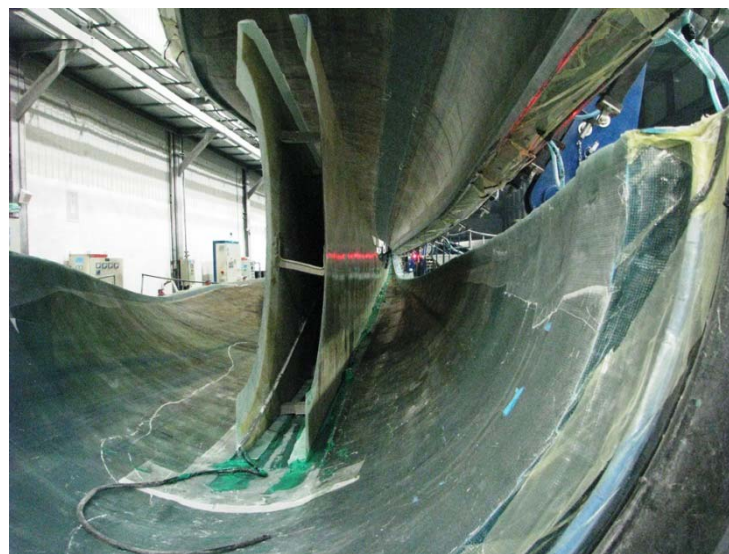
- 1、主梁、腹板预制件+真空灌注成型+上下蒙皮、腹板对模粘接
- 2、腹板预制件++真空灌注成型+上下蒙皮、腹板对模粘接
- 3、叶根缠绕成型+主梁预浸料真空袋压成型+腹板、叶根缠绕+组件粘接
- 4、一体化灌注整体成型

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

路线1：主梁、腹板预制件+真空灌注成型+上下蒙皮、腹板对模粘接



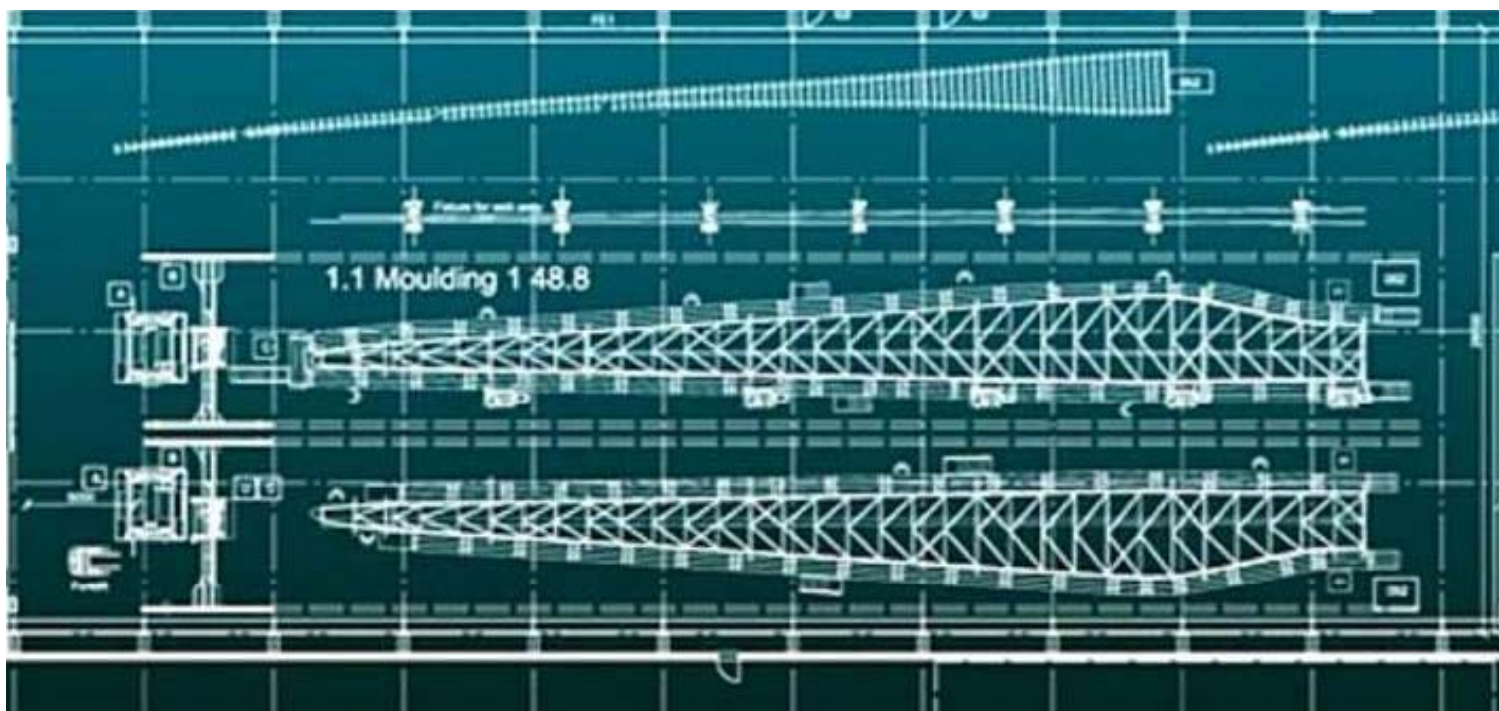
蒙皮铺层



合模粘接

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

路线2：腹板预制件++真空灌注成型+上下蒙皮、腹板对模粘接



二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

路线3： 叶根缠绕成型+主梁预浸料真空袋压成型+腹板、叶根缠绕+组件粘接



叶根、腹板和蒙皮粘接



缠绕叶根

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

路线2：一体化灌注整体成型



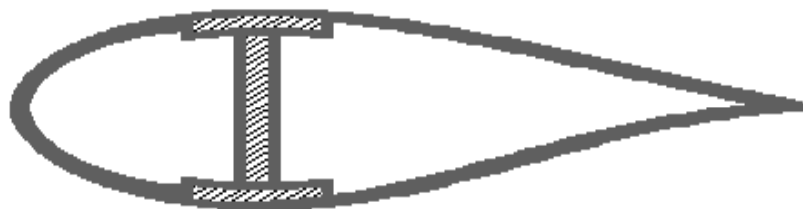
纤维铺层



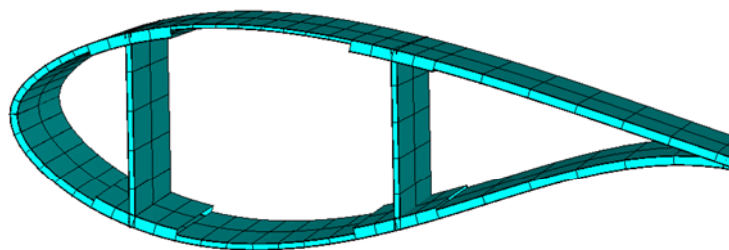
上模

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

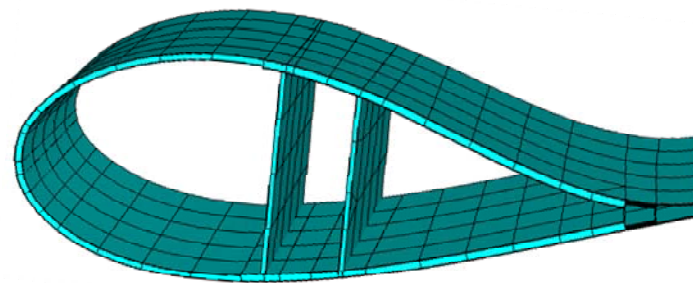
大型风电叶片典型结构形式



工字梁结构

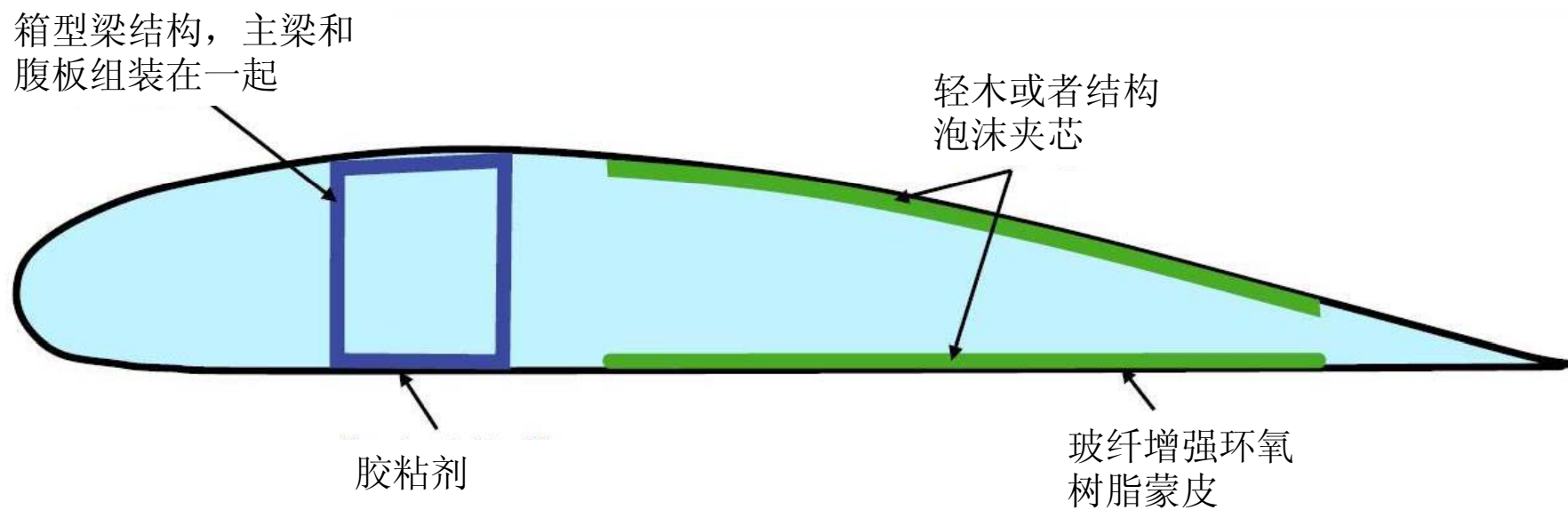


双梁双腹板结构



单梁双腹板结构

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

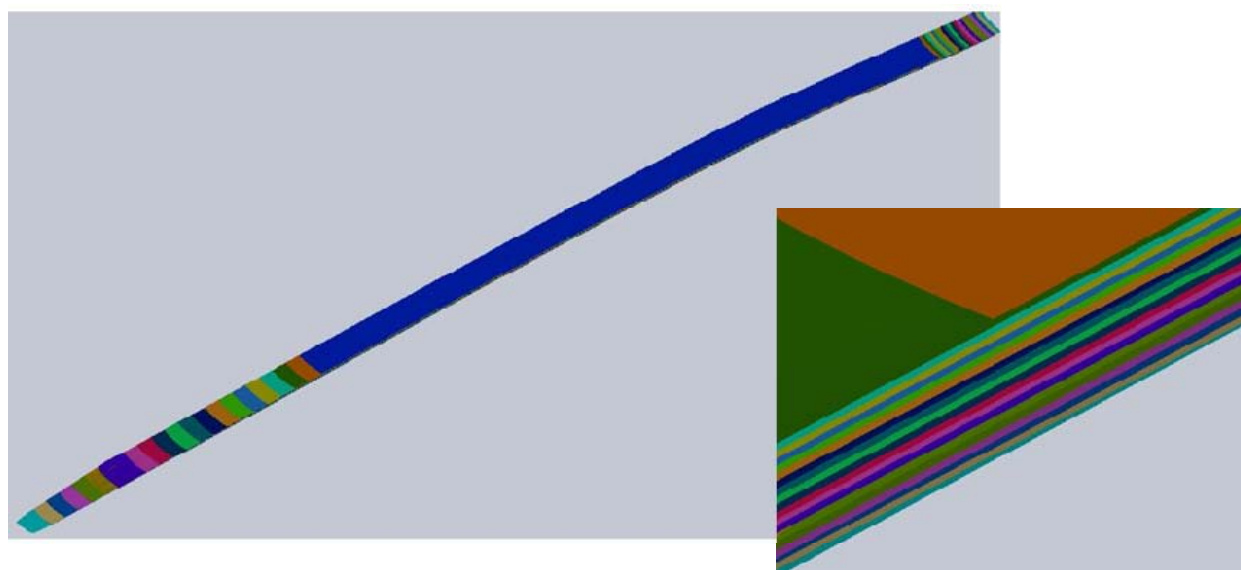


箱型梁结构风电叶片剖面结构

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构

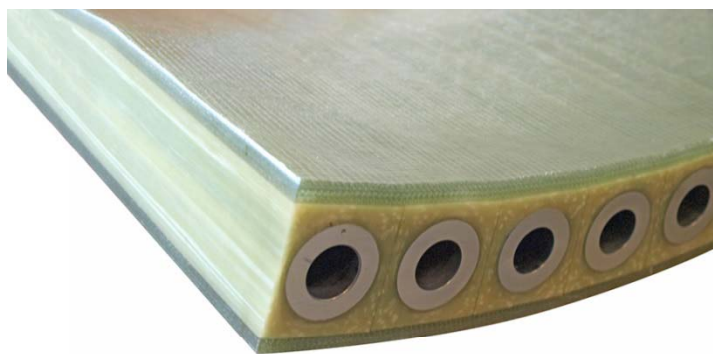
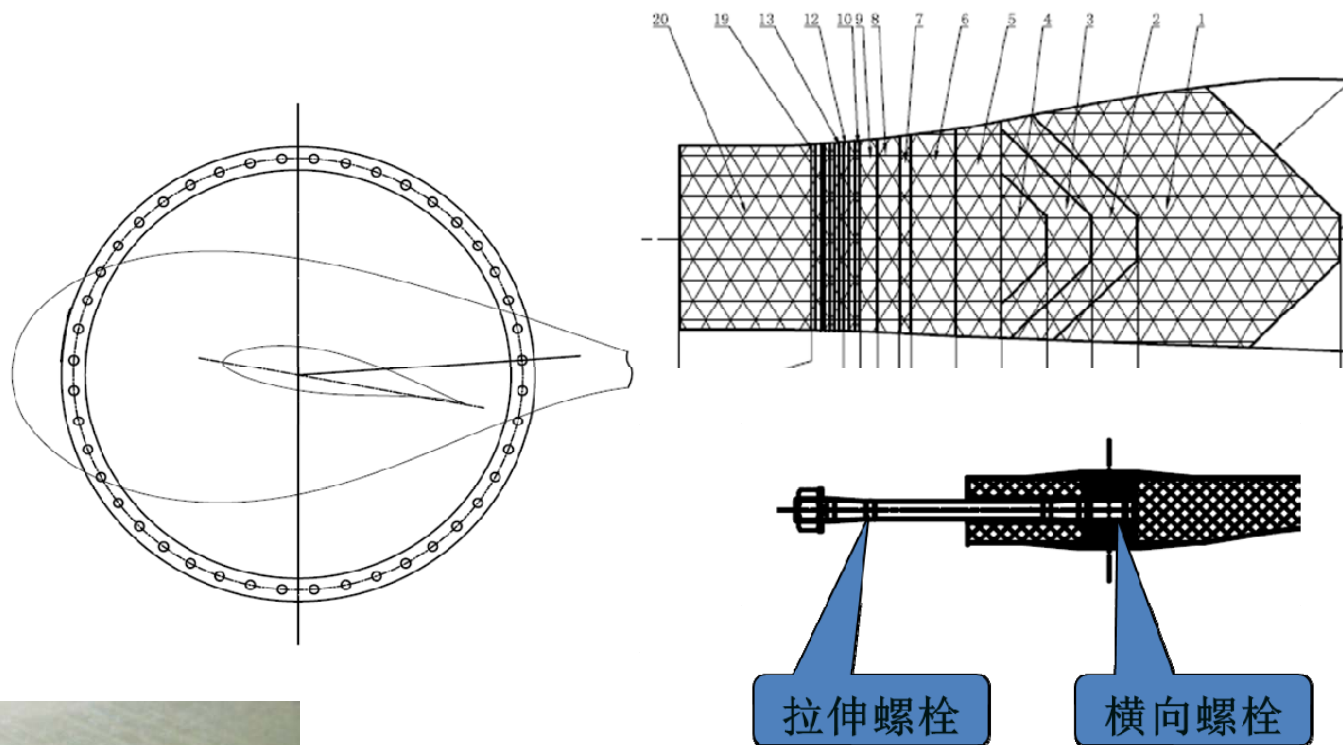
主梁设计

- 主梁位置
- 主梁宽度
- 主梁厚度



设计目标—等强度理论

二、复合材料风电叶片制造工艺和典型结构



叶根螺栓套预制件

风电叶片叶根设计和校核

三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

未来主要发展和应用的方向：

1、高性能材料在风电叶片中的应用

包括碳纤维、碳玻混杂织物、聚氨酯树脂、高性能结构泡沫等

2、高效率复合材料结构形式

3、模内涂装技术

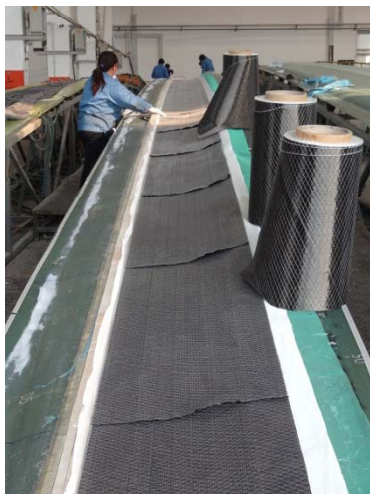
4、自动化制造技术

5、风电叶片长寿命防护

6、技术智能叶片技术

三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

国内首支应用国产碳纤维真空导入成型的碳纤维复合材料叶片



- 45.2m叶片 主梁帽由2.8吨减至0.7吨，使得叶片减重27%至6.1吨重
- 通过真空灌注技术使得叶片静力测试性能达到同类碳纤维预浸料水平



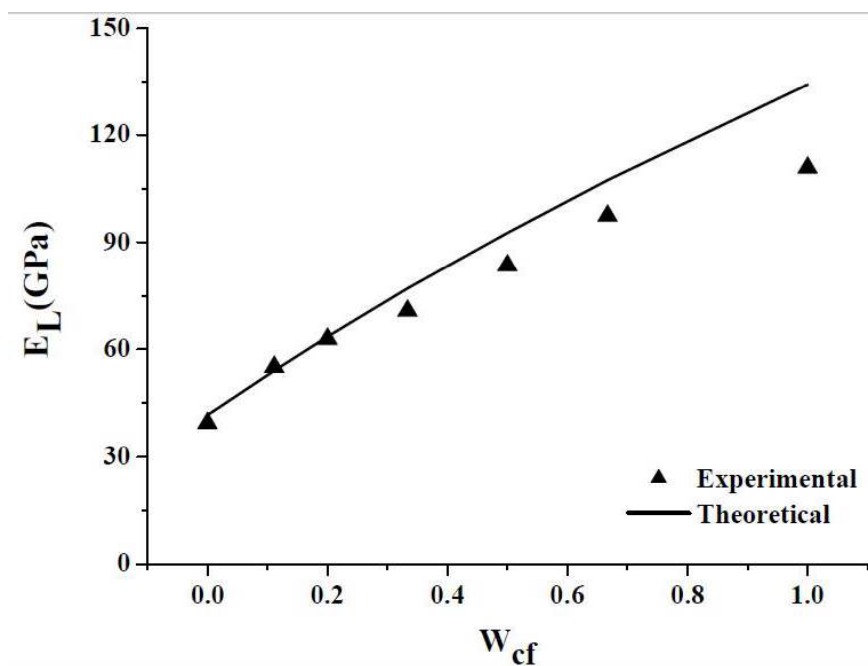
三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

碳纤维复合材料单向织物和预浸料性能

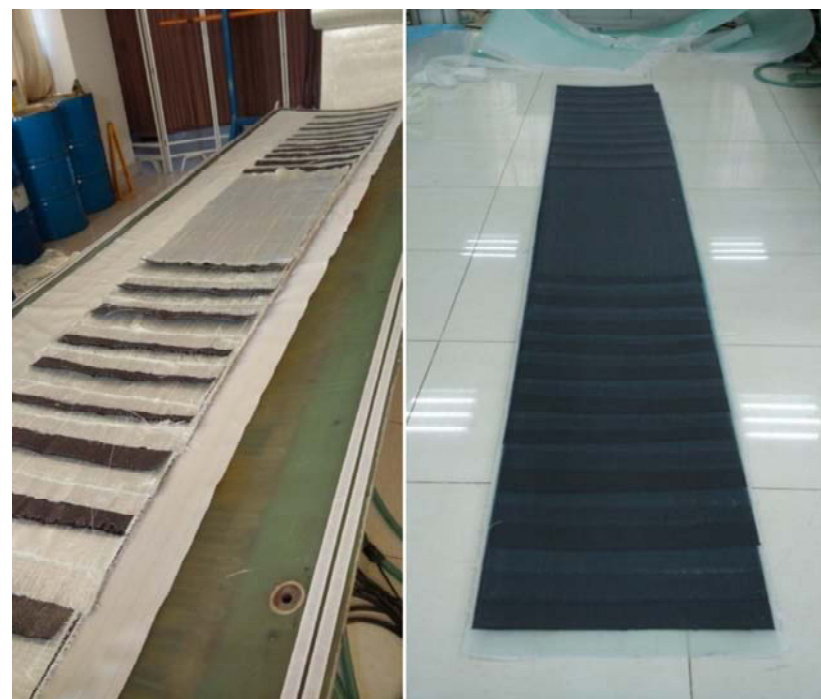
	测试项目	碳纤维真空灌注复合材料	碳纤维预预浸料
	0° 拉伸强度MPa	1880	2050
	0° 拉伸模量GPa	141	134
	0° 压缩强度MPa	631	765
	0° 压缩模量GPa	119	133
	90° 拉伸强度MPa	57	39.47
	90° 拉伸模量GPa	9.9	6.91
	90° 压缩强度MPa	177	126
	90° 压缩模量GPa	9.22	7.86
	±45° 剪切强度MPa	70.84	57.39
	±45° 剪切强度GPa	5.13	3.56

三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

碳玻混杂复合材料



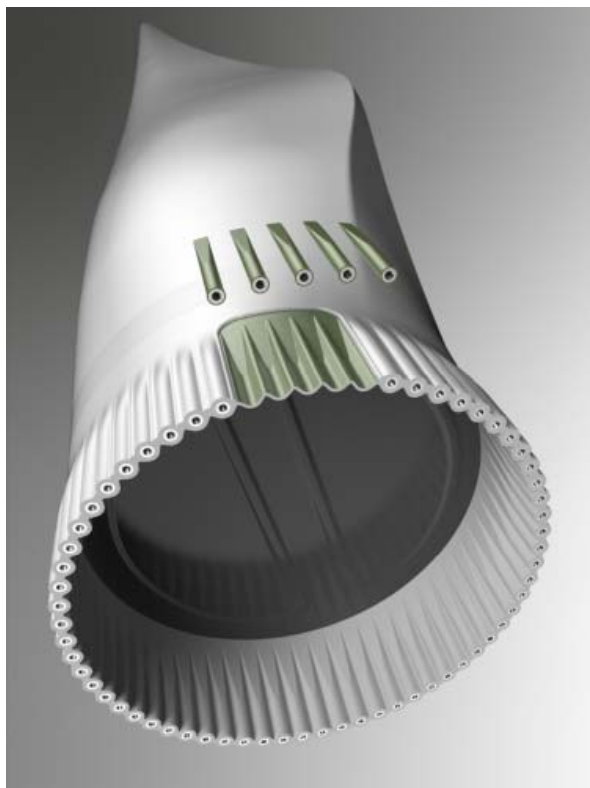
纵向拉伸模量随纤维质量含量变化的曲线



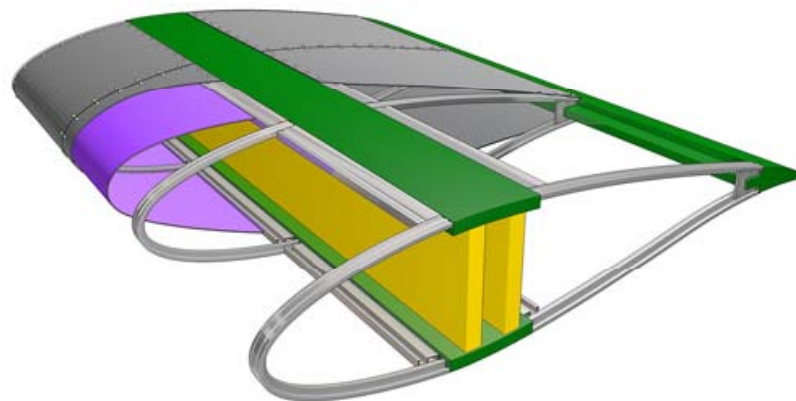
碳玻混杂复合材料真空灌注试验

三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

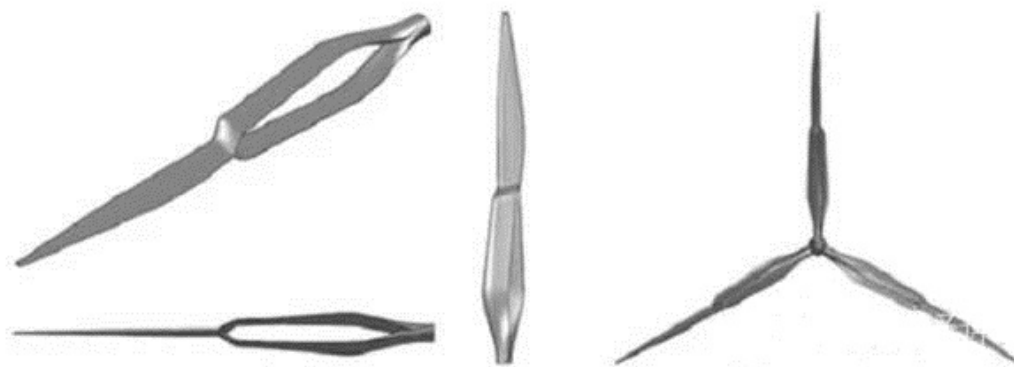
2、高效率复合材料结构形式



轻薄的叶根结构设计，可以大幅度降低叶根的重量



GE提出的金属骨架和织物面层的概念设计，据测算可以降低叶片成本25-40%。



双面外形的翼型，具有更高的升阻比，失速特性更为缓和，具有更高的发电量；可以提高该区域的叶片刚度，降低叶片重量。

3、风电叶片制造模内涂装技术

模内涂装的好处：

- 有效缩短制造工序，大幅度节省后处理工序打磨、刮腻子、涂装的工序时间；
- 降低劳动力成本，降低对环境的污染；

需要解决的问题：

- 使用什么样的材料，是涂料？胶衣？……新的材料类型？
- 耐候性、防污、耐磨损如何统一？

已经有的案例：LM Windpower使用的模内胶衣。

三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

4、自动化制造技术



自动化纤维铺层设备



自动化切除飞边设备



自动化打磨设备

三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

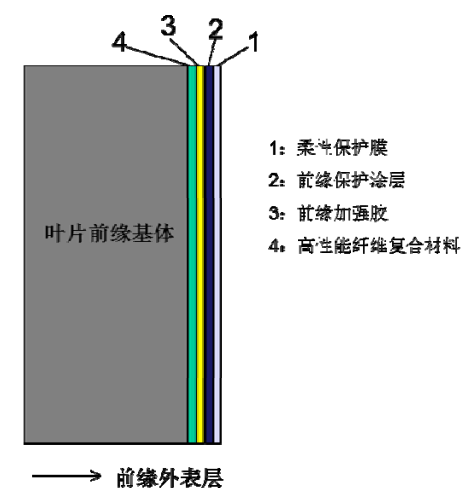


风电叶片前缘损伤照片

可以应用的前缘防护材料

3M防护膜，前缘防护胶衣

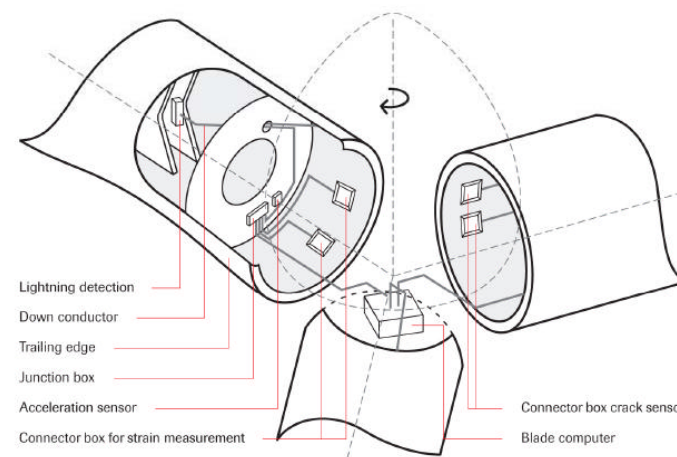
耐磨、耐候的高分子材料与纤维强材料的复合结构



三、复合材料在风电叶片中应用的未来发展

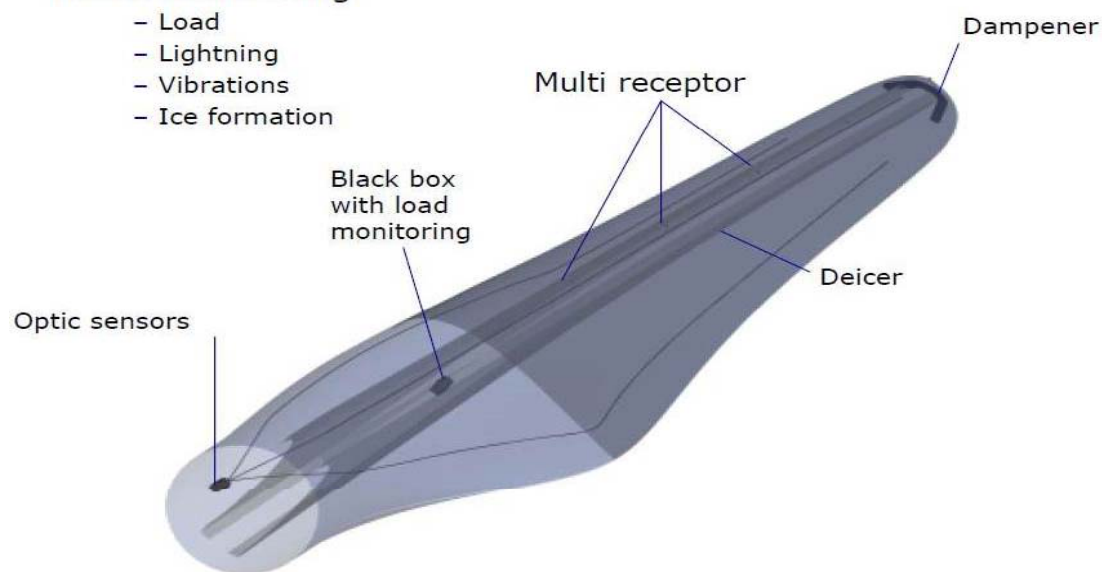


叶片中的传感器将准确测量不同位置的风速，并计算它们何时可以获得最多的电能，同时载荷传感器能够测量叶片载荷，提供给中央数据处理系统，通过控制策略确保安全负荷。



Blade monitoring

- Load
- Lightning
- Vibrations
- Ice formation



From LM

欢迎

批评

指正

