

风电叶片测试创新发展中心成立大会 暨立项论证会

会 议 手 册

中国·北京

二〇二零年九月

目 录

会议须知	1
会议议程	2
与会专家名单	3
中心章程（草案）	4
叶片检测实验室间能力比对工作组立项申请表.....	9
叶片检测实验室间能力比对工作计划书	11
叶片固有频率测试研究和规范编制立项申请表.....	22
叶片固有频率测试研究和规范编制工作计划书.....	23
工作平台地址和登录	39

会议须知

会议名称

风电叶片测试创新发展中心成立大会暨立项论证会

会议时间

2020 年 9 月 27 日（星期日）

会议地点

北京鉴衡认证中心有限公司
（北京市东城区和平里北街 6 号 26 号楼三层纳米毫秒会议室）

会议食宿

自理

会议联系人

王宇婷	13920886339	wangyt@cgc.org.cn
邢海瑞	13071176837	xinghr@cgc.org.cn

会议日程

- 09:00—09:30 现场会议签到
- 09:30—09:50 鉴衡领导致辞及创新中心介绍
- 09:50—10:00 创新中心专家委员聘任仪式
- 10:00—10:25 审议中心章程（草案）
- 10:25—11:05 项目工作组立项论证申请
拟申请项目工作组：
叶片检测实验室间能力比对项目工作组
叶片固有频率测试影响因素研究和测试规范编制项目工作组
- 11:05—11:15 合作备忘录签约仪式
- 11:15—11:30 中心工作平台介绍和公布投票结果
- 11:30—13:30 午餐

参会单位名单

序号	单位
1	连云港中复连众复合材料集团有限公司
2	中材科技风电叶片股份有限公司
3	中科宇能科技发展有限公司
4	吉林重通成飞新材料股份公司
5	株洲时代新材料科技股份有限公司
6	东方电气风电有限公司
7	上海艾郎风电科技发展(集团)有限公司
8	洛阳双瑞风电叶片有限公司
9	国电联合动力技术有限公司
10	北京金风科创风电设备有限公司
11	上海电气风电集团股份有限公司
12	明阳智慧能源集团股份公司
13	远景能源有限公司
14	浙江运达风电股份有限公司

风电叶片测试创新发展中心 章程（草案）

第一章 总则

第一条 中文名称为：风电叶片测试创新发展中心（下文简称“中心”）；英文名称为：Blade Test Innovation and Development Center。

第二条 中心是在自愿、平等、互利、合作的基础上，由国内风电叶片测试实验室、叶片制造和设计单位、整机设备制造商、开发商、叶片原材料单位、行业协会、咨询设计与科研机构工作、叶片测试设备研发单位等自愿结成的开放性、非营利性的社会组织。

第三条 中心是以服务风电叶片测试为宗旨，以解决叶片测试相关关键技术、推动叶片测试标准化，制定行业测试需求解决方案，协助叶片企业提升技术研发水平，促进中国风电叶片测试实验室的成熟发展，维护风电产业和成员单位的合法权益。

第四条 中心接受中国国家认证认可监督管理委员会（CNCA）、中国合格评定国家认可委员会（CNAS）和国家质量监督检验检疫总局的监督和指导。

第五条 中心秘书组设在北京鉴衡认证中心有限公司。

第二章 任务

第六条 中心的主要任务包括：

（一）搭建风电叶片测试技术信息共享、培训与交流的平台。平台集合了叶片测试相关的监管机构、研发机构、实验室以及叶片设计单位等，实现实时在线的技术研发、信息交流以及资源共享，共同促进叶片测试技术进步；

（二）建立协同创新体系。在该体系下，成员单位共同解决测试中面临的问题和挑战，避免科研的重复投入和开发；

（三）解读标准规范，达成行业共识。对于现行标准规范中未尽的或要求不明确的技术条款的解读或补充说明；对现行标准规范中所提出的要求，其表达形式、执行方式或执行流程在实操中不够明确的，提出的执行规则建议；

(四) 规范测试技术流程。实验室可以共同完善现有测试技术的不足，实现叶片测试的进度、精度与安全性的提升；

(五) 促进与国际组织交流，实现叶片测试国际化。开展多种形式的交流与合作，维护中国风电行业的利益与形象，缩短与国外检测能力的差距，消除国际贸易中的检测壁垒，提升行业国际影响力；

(六) 推动成员之间的交流与合作，逐步形成有效的合作模式；

(七) 开展有利于风电产业发展的公益事业。

第三章 中心成员

第七条 本中心成员由单位组成。成员代表由成员单位指定。

第八条 申请加入本中心的成员，必须具备下列条件：

- (1) 依法注册的企事业单位、社团组织、高等院校、科研院所；
- (2) 拥护本中心的章程，有加入本中心的意愿；
- (3) 在本中心的任务、行业、学科、领域内具有一定的影响；
- (4) 履行成员义务，积极参加中心工作和活动。

第九条 成员加入中心的程序是：

- (1) 向中心秘书组提交加入申请书；
- (2) 由中心秘书组初审后报叶片专家委员会；
- (3) 专家委员会审议通过；
- (4) 履行相应程序后成为中心成员。

第十条 中心成员享有下列权利：

- (1) 获得中心面向全体成员统一发布的资讯信息；
- (2) 参加中心组织的各种会议；
- (3) 按中心规则，监督中心的重大事宜；
- (4) 参加中心组建的工作组；
- (5) 承接中心委托的合作项目；

第十一条 成员履行下列义务：

- (1) 遵守中心章程、执行中心决议；
- (2) 全力维护中心的权益和声誉，不得以中心名义从事有损行业声誉和侵害客户利益的活动；

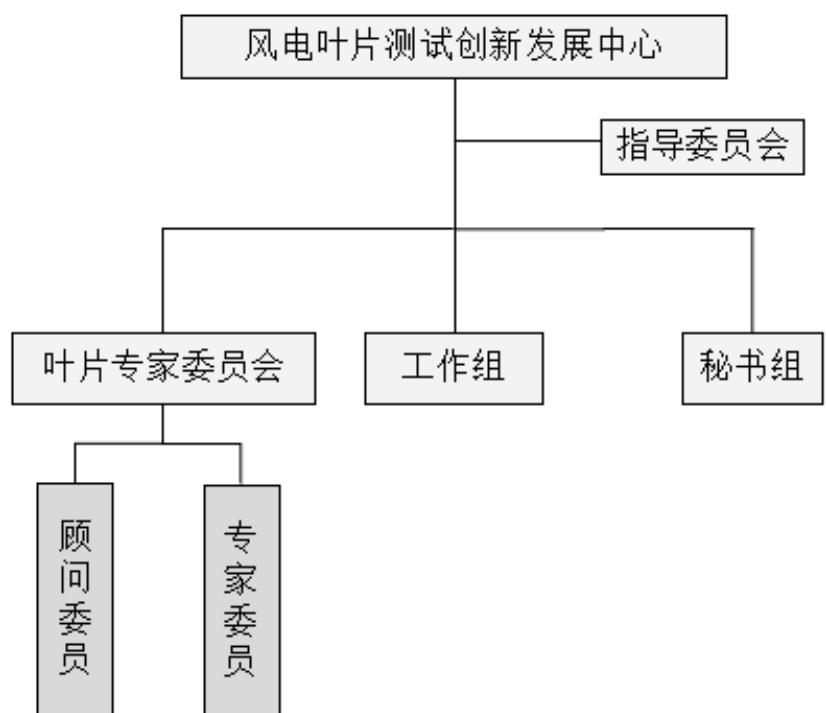
- (3) 积极参加中心组织的各类工作和活动；
- (4) 对中心合作规则细节以及内部讨论的问题，在尚未正式公开对外发布之前不得向外透露；

第十二条 成员退会

- (一) 成员退会自由，退会时应书面通知中心秘书组，履行有关手续后终止成员资格；
- (二) 成员单位因重大违法违纪或被行政管理部门取消经营许可，则其成员资格自动取消。

第十三条 成员如有严重违反本章程的行为，经叶片专家委员会表决通过，予以除名。

第四章 组织机构



第十四条 中心组织机构由指导委员会、叶片专家委员会、工作组、秘书组构成。

第十五条 中心受指导委员会监督。指导委员会由中国国家认证认可监督管理委员会（CNCA）、中国合格评定国家认可委员会（CNAS）和国家质量监督检验检疫总局的专家组成。

第十六条 叶片专家委员会主要是负责中心总体工作。叶片专家委员会由北京鉴衡聘任的顾问委员和专家委员组成。

顾问委员由成员单位的、具备多年风电叶片技术研究经验并在其中某些领域具有行业话语权的专家组成。

顾问委员的主要职责是：

- (1) 审议中心发展规划和工作方针；
- (2) 提出立项建议；
- (3) 审议论证中心的项目立项申请，草案和工作报告；
- (4) 指导项目的执行，并提供相应的意见咨询；
- (5) 其他重大事宜。

专家委员主要由成员单位的、具有风电叶片技术实践经验的和理论水平的人员组成。

专家委员的主要职责是：

- (1) 参与审议中心的项目立项申请、草案；
- (2) 为中心的项目立项申请、草案提供技术支持；
- (3) 提出项目立项提议；
- (4) 参与中心已成立项目的研究、实施以及成果报告编写、交付；
- (5) 其他重大事宜。

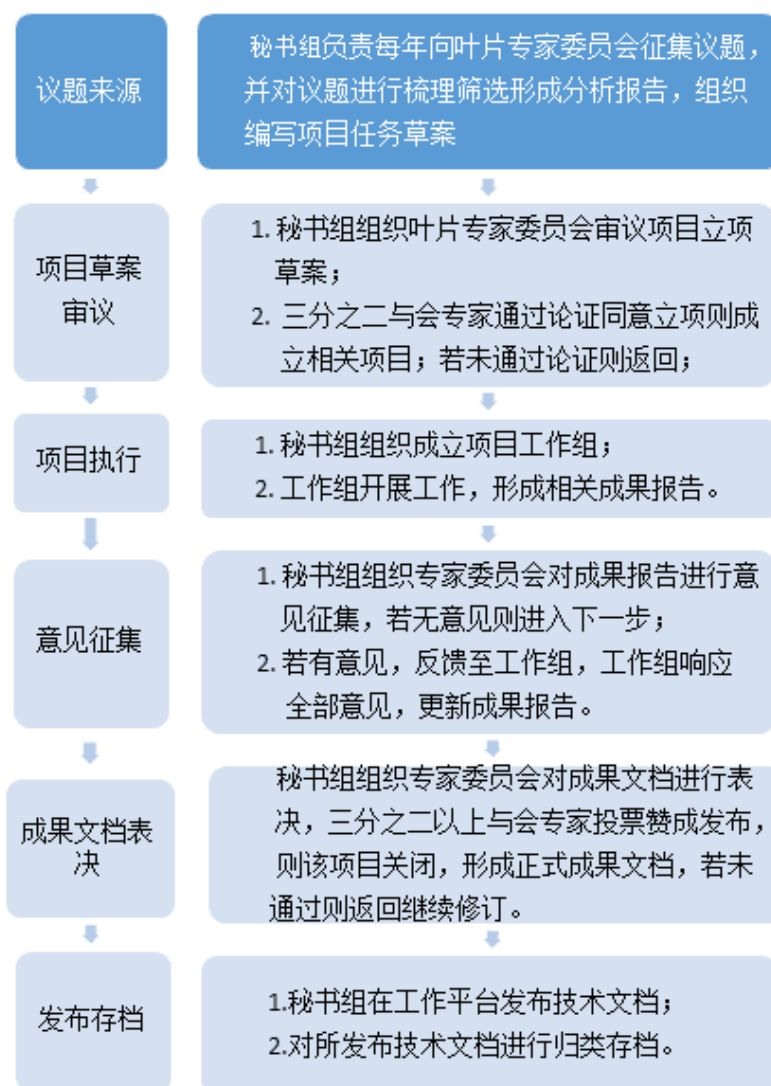
第十七条 工作组是中心的设立的临时机构，根据已成立项目任务的需要，由秘书组组织顾问委员、专家委员和成员单位其他人员成立相应工作组，负责项目任务的研究、实施以及成果报告编写、交付，对叶片专家委员会负责。工作组召集人由秘书组提议确认。

第十八条 中心设立秘书组作为日常办事机构。其主要职权是：

- (1) 执行叶片专家委员会各项决议，负责组织、管理、协调中心以及工作组的工作；
- (2) 负责组织中心各项会议；
- (3) 负责议题征询、梳理并编制议题草案，形成分析报告提交专家委员会审议；
- (4) 负责起草中心工作规划和工作方针；

- (5) 负责中心成员加入与退出申请的受理；
- (6) 负责组织对接中心与政府、企业、其它机构等的项目合作；
- (7) 负责媒体宣传、展会推广、交流研讨等工作；
- (8) 负责办理中心的其他事项。

第五章 议事规程



第六章 章程修改

第十八条 对本章程的修改，由秘书组组织叶片专家委员会审议并表决，三分之二以上成员参会，参会人员超过三分之二表决通过后，方可修改。

第七章 附则

第二十条 本章程经 2020 年 9 月 27 日成员代表大会表决通过。

第二十一条 本章程的解释权归属风电叶片测试创新发展中心。

风电叶片测试创新发展中心

立项申请表

项目名称	叶片检测实验室间能力比对	项目 所属领域	新能源
项目申请人 姓名	贾攀峰	项目申请人 联系方式	18101358306
项目申请人 所在单位	北京鉴衡认证中心有限公司	项目申请人 职务	叶片检测工程师

立项背景和意义、实施路线：

项目背景：

- (1) 叶片的固有频率是风机的一项重要参数，随着叶片的不断增长，其固有频率也在不断的降低，这对于固有频率测试的精确度有了更高的要求。现有的固有频率测试方法主要是通过测力法或不测力法来进行，测试原理相差不大，主要的影响因素集中在：a) 传感器的布置方式和采集精度；b) 采集数据的处理方法；c) 叶片的固支状态等。目前各实验室设备、测试方法各异，结果存在差异。
- (2) 作为检测实验室，不论是 ISO/IEC 17025，还是 IEC RETL（国际电工委可再生能源测试实验室）中 IECRE OD-005 对实验室的评审要求，进行实验室间能力比对或能力验证都是必不可少的。

项目意义：

- (1) 确定各实验室进行叶片测试的能力，并对实验室能力进行持续监控；
- (2) 识别各实验室间的测试结果差异，分析差异原因；
- (3) 通过能力比对，各家实验室识别自己存在的问题，并制定优化措施，改善检测方法和数据处理方式，使各家实验室测量值更精确；
- (4) 共同讨论研究现有检测方法和技术细节的疑点难点，促进固有频率测试技术水平的提升与进步；
- (5) 增加行业对各叶片实验室的信任。

实施路线：

第一步：在相同的叶片、相同的环境条件、相同的叶片安装固定条件下由成员采用不同的设备、方法、人员进行测试

第二步：组织成员单位对测试结果进行比对分析，并对测试过程进行复现，分

析测试问题，进行测试方法优化，并在后续的测试中进行测试验证。		
预期成果、项目周期：		
预期成果：		
(1) 固有频率能力比对报告，内容主要包含结果比对、差异原因分析、优化措施。		
(2) 叶片检测实验室能力比对白皮书，形成能力比对规则文件，以及数次比对效果评估分析。		
项目周期： 预计 6 个月。		
推荐项目成员、成员单位、联系方式：		
李忠祥	连云港中复连众复合材料集团有限公司	15240338889
王徐莉	新疆金风科技股份有限公司	18621700656
张登刚	中材科技风电叶片股份有限公司	13521124349
翁振辉	上海艾郎风电科技发展(集团)有限公司	18817393200
谢红杰	株洲时代新材料科技股份有限公司	15388033031
刘宗杰	保定华翼风电叶片研究开发有限公司	13930860815
黄永东	东方电气风电有限公司	13778217063
贾攀峰	北京鉴衡认证中心有限公司	18101358306
吕路勇	广东鉴衡海上风电检测认证中心有限公司	15369233633
杨海江	明阳智慧能源集团股份公司	18622282803

**叶片检测实验室间能力比对
项目工作组工作计划书
阶段一：固有频率能力比对**

**风电叶片测试创新发展中心
2020 年 9 月 27 日**

目 录

1	概述.....	13
2	参考依据.....	13
3	叶片固有频率比对.....	13
3.1	背景和意义	13
3.2	实施路线	14
3.3	拟参与实验室	14
3.4	基本规划	15
3.5	基本要求	15
3.6	测试项目	15
3.7	试验样品	16
3.8	叶片安装	16
3.9	测试方法和设备安装	17
3.10	数据处理要求	17
3.11	评价准则	17

1 概述

通过定期开展不少于 4 次的固有频率测试活动的比对，对各参与机构的固有频率测试能力差异进行分析，识别测试不足进行技术改进与提升，促进固有频率测试技术水平的提升与进步。

固有频率作为风电叶片检测实验室间能力比对的第一阶段工作开展，项目组后续会计划相继开展有关风电叶片测试的第二阶段（叶片重量重心测试）、第三阶段（叶片静力测试）等能力比对项目。

2 参考依据

- (1) ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- (2) IEC 61400-23:2014: Wind turbines-Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades.
- (3) GB/T 25384-2018 风力发电机组风轮叶片 全尺寸结构试验

3 叶片固有频率能力比对

3.1 背景和意义

叶片的固有频率是风机的一项重要参数，随着叶片的不断增长，其固有频率也在不断的降低，这对于固有频率测试的精确度有了更高的要求。现有的固有频率测试方法主要是通过测力法或不测力法来进行，测试原理相差不大；主要的影响因素集中在：a) 传感器的布置方式和采集精度；b) 采集数据的处理方法；c) 叶片的固支状态等。目前各家实验室设备、测试方法、叶片固支条件各异，

作为检测实验室，不论是 ISO/IEC 17025，还是 IEC RETL（国际电工委可再生能源测试实验室）中 IECRE OD-005 对实验室的评审要求，进行实验室间能力验证或比对都是必不可少的。

国外叶片检测实验室于 2013 年和 2016 年组织过 2 次较大规模的叶片检测实验室间能力验证比对工作，而国内较少组织进行过该项工作。

通过能力比对，可以

- (1) 确定各实验室进行叶片测试的能力，并对实验室能力进行持续监控；
- (2) 识别各实验室间的测试结果差异，分析差异原因；

(3) 通过不少于 4 次的能力比对，各家实验室识别自己存在的问题，并制定优化措施，改善检测方法和数据处理方式，使各家实验室测量值更精确；

(4) 共同讨论研究现有检测方法和技术细节的疑点难点，促进固有频率测试技术水平的提升与进步；

(5) 增加行业对各叶片实验室的信任。

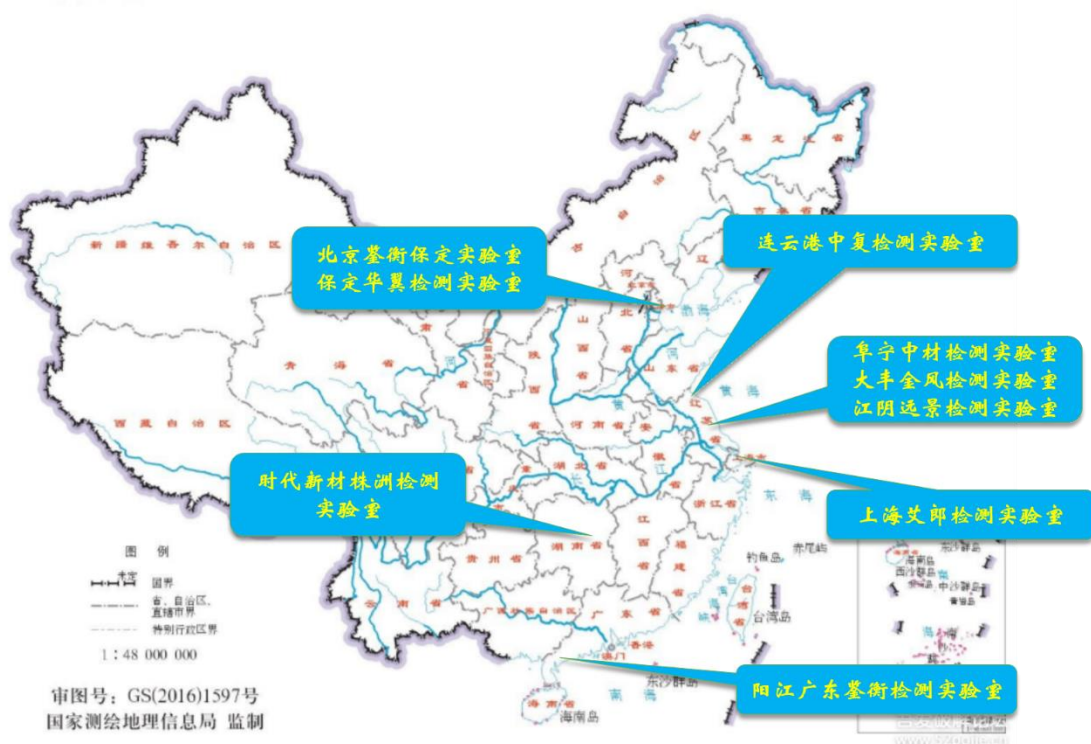
3.2 实施路线

为了实现能力比对的充分性，本次实验室能力比对计划分 4 次开展固有频率的实验室间能力比对。每次比对分二个步骤进行。

第一步在相同的叶片、相同的环境条件、相同的叶片安装固定条件下由成员采用不同的设备、方法、人员进行测试。

第二步组织成员单位对测试结果进行比对分析，并对测试过程进行复现，分析测试问题，进行测试改进，并在后续的测试中进行测试验证。

3.3 拟参与实验室



3.4 基本规划

对于 2020-2021 年度的能力对比测试规划如下所示：

序号	计划时间	举办单位	拟参与单位
第一次能力比对	2020.01	中复连众	鉴衡、华翼、金风
第二次能力比对	2020.10	金风科技	中复、鉴衡、中材、华翼
第三次能力比对	2020.12	中材科技	中复、鉴衡、华翼、金风
第四次能力比对	2020.02	北京鉴衡	中复、中材、华翼、金风
.....			
备注：以下所有对比测试，举办方只负责总体规划、时间协调和提供场地和叶片，各参与方需自行负担由此产生的差旅费用。			

3.5 基本要求

➤ 人员要求

- 需要满足单个实验室出具测试人员人数不少于（含）2 人；
- 参与人员需为各实验室正式人员，需携带上岗证等证明文件；
- 如有登高作业，需要具备登高证；
- 测试场地实验室负责核对记录设备操作人员的资质证明及培训等相关资料。

➤ 设备要求

- 测试所需的设备、软件及笔记本等需要自备；
- 所使用设备需要提前报备型号，并出具设备校准文件；
- 设备数量需要满足方案要求；

➤ 其它要求

- 测试方案需要在测试开始前提前发送组织方审核，通过后方可进行现场操作；

3.6 测试项目

固有频率测试具体见附录一，测试项如下表所示：

模态/Mode	频率 /Frequency	阻尼比/Damping ratio	振型图/Modal shape figure
1 st flapwise	√	√	√
1 st edgewise	√	√	√
2 st flapwise	√	√	√
2 st edgewise	√	√	√
1 st torsion	√	√	√
注：以上测试需要考虑空气阻尼的影响。			

3.7 试验样品

举办比对测试的实验室负责提供测试试验台、样片、夹具、加载支架等必备测试资源，并安装至测试台（安装方法附录要求）；

所用比对试样由测试地实验室负责提供，比对测试样品需要具有以下特征：

- 1、此样品是从样品集合中随机选取的；
- 2、此样品的编号、型号应进行遮挡；
- 3、此样品的理论数据应在整个对比测试期间保密；

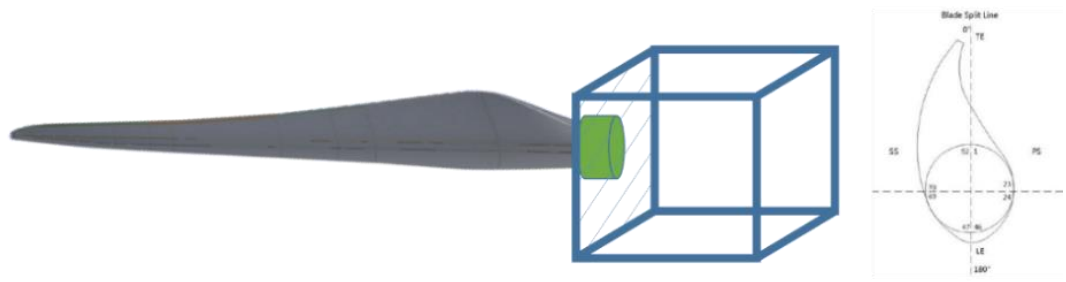
在测试开始前，叶片提供方应将叶片检查报告和叶片基本信息提供给各个测试单位，如下表所示。

叶片长度	
质量	
重心位置	
螺栓孔节圆直径	
叶尖预弯	
螺栓规格	
螺栓安装预紧力矩	

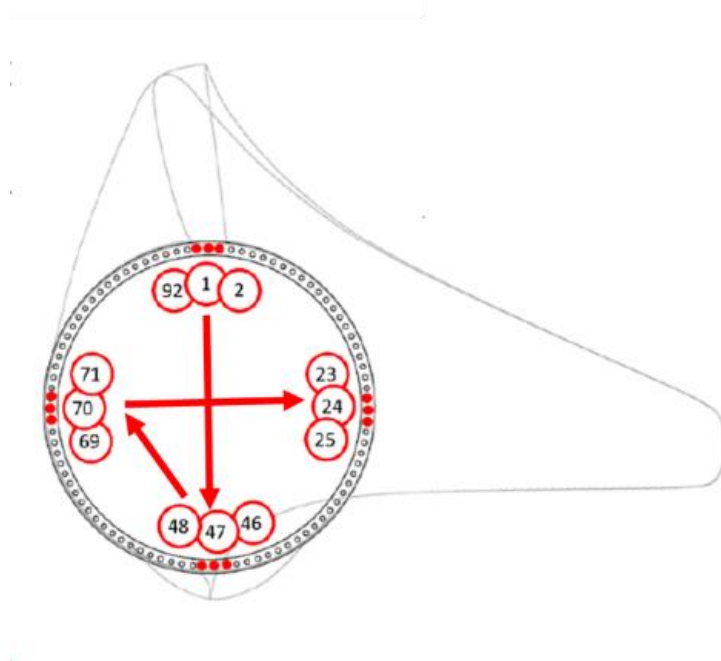
3.8 叶片安装

叶片的安装由叶片提供实验室负责进行，需要满足以下要求：

- 1）安装方式：推荐后缘朝上安装（0°安装角），示意图如下所示。



2) 叶根力矩施加方式：米字型施加，如下图所示。



先用电动扳手将螺栓逐个的拧紧，再用液压力矩扳手打力矩，此时采用米字型打发；

- 先打 70%力矩；

将 1 号附近的螺栓打到 70%力矩，然后再将对角 47 号附近的螺栓打到 70%力矩，如图中箭头所示；当打完第一遍力矩时，叶尖的吊车要松开；

- 再打 100%力矩；

上一步结束后，按照以上顺序再将螺栓依次打满预紧力。第二遍力矩打完上半圈的时候，叶根部位的吊车松开。

力矩的大小要根据叶片的不同进行调整，并对所施加力矩进行记录。

3.9 测试方法及设备安装

由各个参与比对的实验室进行操作，设备为各个实验室自带设备。其中，设备的选择、安装、布线等均由参与者自行设计决定，需要在测试报告中指明。

同时，测试中还应该满足一下几个要求：

- 1) 所用设备均处于校准有效期内；
- 2) 操作人员具有相应的操作资质；
- 3) 操作中所用到的基本检测设备均由参与者自行携带；
- 4) 有效信号采集时长均不得低于 120s；
- 5) 测试次数不低于 3 次，结果记录表见附件所示；
- 6) 测试中应记录实时的温湿度；
- 7) 测试过程应保证实际风速低于 3m/s；
- 8) 如果需要进行人员对比，则单个试验的测试人员不少于 2 人，分别单独进行测试，测试报告分别独立出具；

3.10 数据处理要求

- 所有参与者需要保留传感器获取的原始信号，并以此进行数据分析。处理方方法和软件不限，但在报告中需要说明基本原理；
- 检测结果统一保留小数点后三位有效数字，如频率为 4.625Hz、阻尼比为 0.238%。
- 数字修约规则【4 舍 6 入 5 看右，5 后有数进上去，尾数为 0 向左看，左数奇进偶舍弃】，具体解释如下：
 - 第四位数字小于 5 时，则舍去；
 - 第四位数字大于等于 5 时，其后跟有并非全部为 0 的数字时则进 1。
 - 第四位数字大于等于 5 时，其后无数字或皆为 0 时，若第三位为奇数则进一，为偶数（含 0）则舍弃；
 - 禁止连续修约；

3.11 评价准则

使用 E_n 比率来评定实验室的每一个单独结果。 E_n 定义为：

$$E_n = \frac{X_{\text{LAB}} - X_{\text{REF}}}{\sqrt{U_{\text{LAB}}^2 + U_{\text{REF}}^2}}$$

例中：X_{LAB}——参加实验室的结果

X_{REF}——参考实验室的结果

U_{LAB}——是参加实验室报告的不确定度

U_{REF}——是参考实验室报告的不确定度。

评价标准：对于一个结果，可接受的一个E_n比率应在-1到+1之间，即E_n（越接近零越好）。

3.12 预期成果

(1) 叶片固有频率测试能力比对报告，内容含：

A、固有频率测试报告

每次比对活动结束后，参与实验室应在 10 个工作日内完成数据分析和检测报告，并发送至相应组织人（jiapf@cgc.org.cn）。

测试报告至少需要包含以下内容：

1. 测试叶片描述：基本参数、安装方式、叶片状态（维修、配重等）；
2. 所选方法基本原理介绍；
3. 所选设备的基本型号、校准编号及不确定度等；
4. 实际测试方法：测试环境、设备安装、信号采集方法等；
5. 数据处理方法介绍；
6. 结果分析；
7. 不确定度分析；
8. 测试偏离项；

B、结果比对评价和原因分析

组织单位应在收到所有参与单位提供的检测报告后 10 个工作日内出具实验室间比对结果及评价报告，并根据检测实验室要求隐去相关信息，并发送至各实验室。

比对报告至少需要包含以下内容：

1. 结果比对

2. 结果评价

3. 差异原因分析

C 各实验室固有频率测试方法优化报告

针对每一次组织的能力比对，各家实验室应根据比对结果优化各自的测试方法，并提供优化措施报告，并应用到下一次能力比对中。

(2) 叶片固有频率测试能力比对白皮书

发布叶片固有频率能力比对白皮书，形成行业能力比对规则文档，并对数次能力比对的效果进行汇总分析。

固有频率测试记录表							
实验室名称:		项目说明:			安装角度:		
项目	固有频率值	阻尼比	固有频率值	阻尼比	固有频率值	阻尼比	
挥舞一阶							
摆振一阶							
挥舞二阶							
摆振二阶							
扭转一阶							
采集仪器, 温湿度表							
传感器安装位置[m]							
传感器编号							
记录人员:		测试时间:		环境条件:		复核人员:	

风电叶片测试创新发展中心

立项申请表

项目名称	叶片固有频率测试影响因素研究和测试技术规范编制	项目所属领域	新能源
项目申请人姓名	邢海瑞	项目申请人联系方式	13071176837

立项背景和意义、实施路线：

项目背景：

虽然固有频率测试方法已经较为成熟，但是在叶片固有频率测试过程中，影响测试的因素有很多，如叶根连接刚度、叶片安装角度、叶片表面温度、叶片激励方式、传感器数量、测点分布、信号处理方法等。且目前各叶片实验室的所使用的测试设备、叶片安装操作方式、信号处理方式各异，较难评价结果准确性。

项目意义：

该项目旨在研究各因素对固有频率测试的影响，消除现有测试中的盲区和缺陷点，改进测试方法，并建设一套标准的叶片固有频率作业规范。

实施路线：

- 第一步：由各实验室分别对影响因素进行研究，分析总结研究结果。
- 第二步：依托上述研究结果，成员单位同步编写测试技术规范。

预期成果：

- (1) 发表研究论文一篇，参与单位共同编写。
- (2) 叶片固有频率测试技术规范 1 套。

项目周期：预计 8 个月。

推荐项目成员、成员单位、联系方式：

李忠祥	连云港中复连众复合材料集团有限公司	15240338889
王徐莉	新疆金风科技股份有限公司	18621700656
张登刚	中材科技风电叶片股份有限公司	13521124349
翁振辉	上海艾郎风电科技发展有限公司	18817393200
谢红杰	株洲时代新材料科技股份有限公司	15388033031
刘宗杰	保定华翼风电叶片研究开发有限公司	13930860815
黄永东	东方电气风电有限公司	13778217063
贾攀峰	北京鉴衡认证中心有限公司	18101358306
吕路勇	广东鉴衡海上风电检测认证中心有限公司	15369233633
杨海江	明阳智慧能源集团股份公司	18622282803
潘祖金	上海电气风电集团股份有限公司	13814273967

**叶片固有频率测试
影响因素研究和测试技术规范编制
项目工作组工作计划书**

**风电叶片测试创新发展中心
2020 年 9 月 27 日**

目 录

1 目的.....	26
2 参与单位.....	26
3 叶片固有频率测试影响因素研究方案.....	26
3.1 安装角度对叶片固有频率测量的影响	26
3.1.1 研究背景	26
3.1.2 研究单位和时间安排	27
3.1.3 样品要求	27
3.1.4 试验台和环境要求	28
3.1.5 叶片安装角度工况	28
3.1.6 叶片安装方式	28
3.1.7 叶片激励方式	28
3.1.8 报告	29
3.2 激励方法对叶片固有频率测量的影响	29
3.2.1 研究背景	29
3.2.2 研究单位和时间安排	29
3.2.3 样品要求	29
3.2.4 试验台和环境要求	29
3.2.5 叶片安装角度	30
3.2.6 叶片安装方式	30
3.2.7 叶片激励方式工况	30
3.2.8 报告	30
3.3 叶片温度对叶片固有频率测量的影响	31
3.3.1 研究背景	31
3.3.2 研究单位和时间安排	31
3.3.3 样品要求	31
3.3.4 温度工况	31
3.3.5 叶片安装角度	32
3.3.6 叶片安装方式	32

3.3.7 叶片激励方式	32
3.3.8 报告	32
3.4 传感器位置对叶片固有频率的影响	32
3.4.1 研究背景	33
3.4.2 研究单位和时间安排	33
3.4.3 样品要求	33
3.4.4 试验台和环境要求	33
3.4.5 叶片安装角度	33
3.4.6 叶片安装方式	34
3.4.7 传感器数量	34
3.4.8 叶片激励方式	34
3.4.9 报告	34
3.5 成果	35
4 规范编写	35
4.1 规范目录	35
4.2 规范编写规划	36
附录 1 坐标系定义	37
附录 2 叶根安装方式	37
附录 3 报告内容	38

1 目的

根据固有频率的测试流程，结合实验室间能力比对取得的结果，深入研究固有频率测试作业细节，消除现有测试中的盲区和缺陷点，建设一套标准、规范的固有频率测试技术规范。

2 参与单位

叶片固有频率测试影响因素研究和规范编制拟定以下单位共同负责：

连云港中复连众复合材料集团有限公司

中材科技风电叶片有限公司

保定华翼风电叶片研究开发有限公司

新疆金风科技股份有限公司

株洲时代新材料科技股份有限公司

北京鉴衡认证中心有限公司

广东鉴衡海上风电检测认证中心有限公司

3 叶片固有频率测试影响因素研究方案

在叶片固有频率测试过程中，影响测试的因素有很多，如叶根连接刚度、叶片安装角度、叶片表面温度、叶片激励方式、传感器数量、测点分布、测量物理量、信号处理方法等，在测试规范编写过程中，研究解决各因素的影响，找到最佳叶片固有频率测试方法。本节主要研究叶片安装角度、激励方式、环境温度与叶片温度、传感器布置位置的影响。

3.1 安装角度对叶片固有频率测量的影响

3.1.1 研究背景

对于无阻尼单自由系统而言，如下图所示，固有频率计算公式定义如下：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

单位为 Hz，表示一秒钟振动循环次数。也可以用圆频率（也称角频率）来表示固有频率，公式如下：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

单位为 rad/s。在这考虑的是无阻尼的情况，因此，获得的固有频率为无阻尼固有频率。对于一般性结构系统而言，如下图所示，都是有阻尼的，因此它的固有频率为有阻尼固有频率。无阻尼固有频率与有阻尼固有频率的关系如下：

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

从上面的公式我们可以看出，结构的固有频率只受刚度分布和质量分布的影响，而阻尼对固有频率的影响非常有限。

随着叶片越来越长，重量越来越大，在重力作用影响下，考虑不同的叶片安装角度会对叶片的刚度分布产生影响，从而影响叶片固有频率。目前行业内固有频率测试过程中，一般采用叶片后缘竖直朝上或迎风面朝上的安装角度，本节旨在研究这两种不同安装角度对固有频率的影响，确定最佳安装角度。

3.1.2 研究单位和时间安排

本节拟负责研究单位为北京鉴衡认证中心有限公司

计划实施完成时间：2020 年 10 月-2021 年 2 月完成

3.1.3 样品要求

样品数量：至少在 2 个不同叶片样品进行测量，并且固有频率理论值已知；

样品质量：样品尽可能保证为新生产叶片，未进行疲劳试验；

样品信息如下表所示：

叶片长度	
质量	
重心位置	
螺栓孔节圆直径	
叶尖预弯	
螺栓规格	
螺栓安装预紧力矩	

3.1.4 试验台和环境要求

试验台要求：要求端面垂直，无倾角；

环境条件：环境温度无特殊要求，不同叶片测量时应尽可能保持温度一致，风速低于二级。

3.1.5 叶片安装角度工况

在试验台坐标系下（见附录 1 所示），定义叶片安装角为叶片坐标系中的 **YB** 轴绕 **Z** 轴偏转的角度。规定 **YB** 轴正半轴与 **X** 轴负半轴重合时为零度，从叶尖向叶根看，逆时针旋转为正，顺时针为负值，如图 3-1-1 所示。安装角度见表 3-1-1 所示。

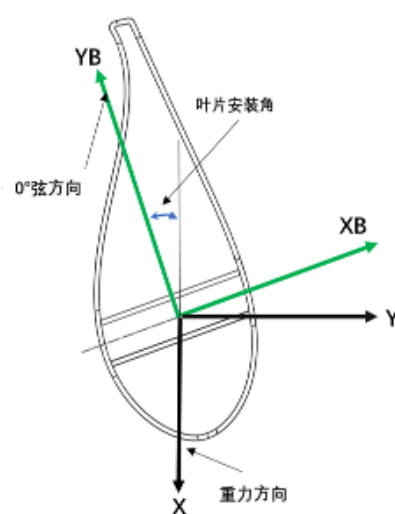


图 3-1-1 叶片安装角图示

表 3-1-1 叶片安装角度

安装角度工况	样片编号	安装角度
工况 1	样片 1	0°
工况 2	叶片 1	-90°
工况 1	叶片 2	0°
工况 2	样片 2	-90°

3.1.6 叶片安装方式

叶片安装见附录 2 所示。

3.1.7 叶片激励方式

采样不测力法对叶片进行激励，采集传感器信号并记录结果，每次测量三组数据。

3.1.8 报告

出具最终检测报告以及结果比对报告。报告内容见附录 3 所示。

3.2 激励方法对叶片固有频率测量的影响

3.2.1 研究背景

模态分析分为测力法和不测力法。测力法是经典的模态分析方法，引入频率响应函数概念，函数反应的是输入和输出之间的关系，反应系统的固有特性，根据传递函数来辨识系统的模态参数。不测力法中传递率的计算方法与测力法的频响函数相似，用参考通道的参考点的响应信号代替了频响函数算法中的力信号。

随着叶片越来越长，在测量风机叶片时，力锤激励能量小，可能不能使得整个叶片结构激振起来，距离激励点较远的测点响应信号小、信噪比差。

目前各实验室的激励方法不一，分为测力法和不测力法，设备也有差异。本节旨在通过对比测力法和不测力法下测得的固有频率结果，分析差异。

3.2.2 研究单位和时间安排

本节拟负责研究单位为：连云港中复连众复合材料集团有限公司

计划实施完成时间：2020 年 10 月-2020 年 2 月完成。

3.2.3 样品要求

样品数量：至少在 2 个不同叶片样品进行测量，并且固有频率理论值已知；

样品质量：样品尽可能保证为新生产叶片，未进行疲劳试验；

样品信息如下表所示：

叶片长度	
质量	
重心位置	
螺栓孔节圆直径	
螺栓规格	
螺栓安装预紧力矩	

3.2.4 试验台和环境要求

试验台要求：试验台无损伤；

环境条件：环境温度范围无特殊要求，不同叶片测量时应尽可能保持温度一致（含叶片表面温度），风速低于二级。

3.2.5 叶片安装角度

在试验台坐标系下（见附录 1 所示），定义叶片安装角为叶片坐标系中的 YB 轴绕 Z 轴偏转的角度。规定 YB 轴正半轴与 X 轴负半轴重合时为零度，从叶尖向叶根看，逆时针旋转为正，顺时针为负值，如图 3-2-1 所示。安装角度见表 3-2-1 所示。

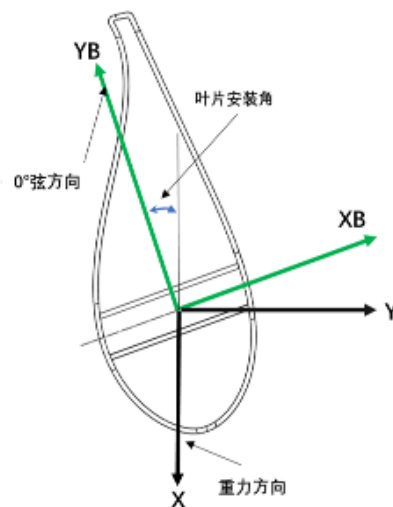


图 3-2-1 叶片安装角图示

表 3-2-1 叶片安装角度

样片编号	安装角度
样片	0°或-90°

3.2.6 叶片安装方式

叶片安装见附录 2 所示。

3.2.7 叶片激励方式工况

针对同一支样片

- 1、第一次采用测力法对叶片进行激励，采集传感器信号并记录结果，每次测量三组数据；
- 2、第二次采用不测力法对叶片进行激励，采集传感器信号并记录结果，每次测量三组数据。

3.2.8 报告

出具最终检测报告以及结果比对报告。报告内容见附录 3 所示。

3.3 叶片温度对叶片固有频率测量的影响

3.3.1 研究背景

由于叶片为玻璃纤维或碳纤维环氧树脂基体复合材料，在较高温度下叶片会相对变“软”，在低温下会相对变“硬”，叶片刚度发生变化，进而影响固有频率测量。

目前国内叶片实验室分为室内和室外，环境各异。本节旨在研究叶片表面在不同温度情况下，分析叶片固有频率的测量差异。

3.3.2 研究单位和时间安排

本节拟负责研究单位为：新疆金风科技股份有限公司

计划实施完成时间：2020 年 10 月-2021 年 4 月完成

3.3.3 样品要求

样品数量：至少在 2 个叶片样品进行测量，并且固有频率理论值已知；

样品质量：样品尽可能保证为新生产叶片，可以接受疲劳试验叶片；

样品保存：因测试过程时间跨度较大，样品应在此期间妥善保存。

样品信息如下表所示：

叶片长度	
质量	
重心位置	
螺栓孔节圆直径	
螺栓规格	
螺栓安装预紧力矩	

3.3.4 温度工况

试验台要求：试验台无损伤；

环境条件：风速低于二级。

叶片表面温度：对叶片在不同温度条件下进行固有频率测试，监控记录叶片表面温度变化情况下，每隔 5℃进行一次固有频率测试。

测试工况	样品	叶片表面温度范围 /℃
第一工况	样品 1	-10~20℃
第二工况	样品 2	20-45℃

3.3.5 叶片安装角度

在试验台坐标系下（见附录 1 所示），定义叶片安装角为叶片坐标系中的 YB 轴绕 Z 轴偏转的角度。规定 YB 轴正半轴与 X 轴负半轴重合时为零度，从叶尖向叶根看，逆时针旋转为正，顺时针为负值，如图 3-3-1 所示。安装角度见表 3-3-1 所示。

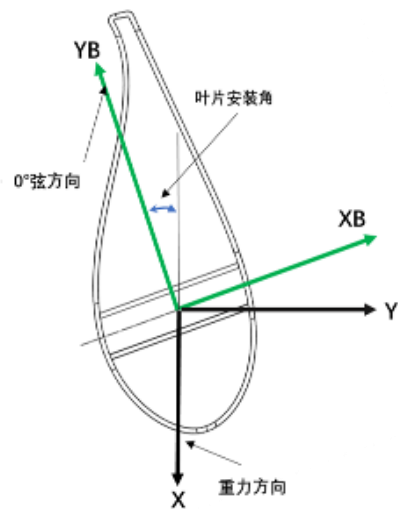


图 3-3-1 叶片安装角图示

表 3-3-2 叶片安装角度

样片编号	安装角度
样片	-90°

3.3.6 叶片安装方式

叶片安装见附录 2 所示。

3.3.7 叶片激励方式

采用测力法或不测力法对叶片进行激励，采集传感器信号并记录结果，每次测量三组数据；

3.3.8 报告

出具最终检测报告以及结果比对报告。报告内容见附录 3 所示。

3.4 传感器布置对叶片固有频率的影响

3.4.1 研究背景

固有频率测量时，理论上讲，只需要一个测量位置即可测量出所有模态对应的固有频率，但是却有一些现实方面的影响，主要体现在以下几个方面：

当仅在结构一个位置布置传感器进行测量时，由于各阶模态的节点位置都是不相同的，因而，固有频率测量会遭遇与模态参考点相同的风险：一个测量位置会导致一阶或几阶固有频率不可见，因为一个测量位置不是这阶模态的节点，就可能是那阶模态的节点的可能性非常大。因此，强烈建议布置多个测量位置。

同时，叶片长度较长，不同的传感器位置会影响整个叶片振动情况的准确反映。本节旨在通过布置不同位置的传感器数量，测量叶片的固有频率，对比结果差异。

3.4.2 研究单位和时间安排

本节负责研究单位为：中材科技风电叶片有限公司

计划实施完成时间：2020年10月-2021年2月完成

3.4.3 样品要求

样品数量：至少在2个叶片样品进行测量，并且固有频率理论值已知；

样品质量：样品尽可能保证为新生产叶片，未进行疲劳试验；

样品保存：因测试过程时间跨度较大，样品应在此期间妥善保存。

样品信息如下表所示：

叶片长度	
质量	
重心位置	
螺栓孔节圆直径	
螺栓规格	
螺栓安装预紧力矩	

3.4.4 试验台和环境要求

试验台要求：试验台无损伤；

环境条件：不同叶片测量时应尽可能保持温度一致（含叶片表面温度），风速低于二级。

3.4.5 叶片安装角度

在试验台坐标系下（见附录 1 所示），定义叶片安装角为叶片坐标系中的 YB 轴绕 Z 轴偏转的角度。规定 YB 轴正半轴与 X 轴负半轴重合时为零度，从叶尖向叶根看，逆时针旋转为正，顺时针为负值，如图 3-4-1 所示。安装角度见表 3-4-1 所示。

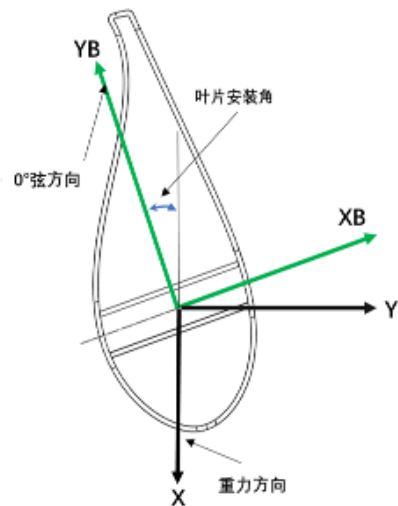


图 3-4-1 叶片安装角图示

表 3-4-1 叶片安装角度

样片编号	安装角度
样片 1 和 2	0°或-90°

3.4.6 叶片安装方式

叶片安装见附录 2 所示。

3.4.7 传感器布置

测试工况	传感器布置位置
第一工况	最大弦长区域
第二工况	叶片 30%~60%区域
第三工况	叶片 60%~90%区域

3.4.8 叶片激励方式

采用测力法或不测力法对叶片进行激励，采集传感器信号并记录结果，每次测量三组数据；

3.4.9 报告

出具最终检测报告以及结果比对报告。报告内容见附录 3 所示。

3.5 成果

根据研究结果，共同发表研究论文，并发布叶片固有频率测试影响因素研究白皮书。

4 规范编写

4.1 规范目录

目录	章节分类
1 试验准备	1.1 测试大纲
	1.2 测试环境要求
	1.3 测试仪器要求
	1.4 测试人员
2 叶片准备	2.1 叶片安装角
	2.2 传感器位置选取
	2.3 叶根连接法兰安装
3 叶片安装	3.1 叶片翻转和起吊
	3.2 法兰与试验台连接
4 检测仪器安装	4.1 传感器安装
	4.2 信号线布置连接
5 测试过程	5.1 测试系统启动
	5.2 叶片激励
	5.3 数据采集
	5.4 数据处理
	5.5 测量结果记录 以及不确定度评估
	5.6 仪器拆卸
	5.7 叶片拆卸
6 报告编写	报告内容

4.2 规范编写规划

(1) 动员分工—2020.10.14

计划于 2020 年 10 月 14 日召开工作组成立会议，会议内容包括制定编写的时间节点、具体任务和要求，安排影响因素研究方案工作。

(2) 资料收集—2020.10.14~11.14

在集中编写前，安排 2~3 周的时间，参编人员根据编写动员会议分工，搜集整理相关资料，预先整理编写思路。

(3) 研讨交流—2020.11.15

定于 8 月下旬，组织研讨会，会上针对规范目录进行讨论交流，对其进行必要的修改，并制定相应分工。

(4) 编写初稿—2020. 11.15~2021.02.20

参编人员根据任务分工，并依托影响因素研究结果，编写初稿。编写周期预计 3 个月。期间，编写组负责人每周汇总各部分编写进展情况，视情况组织交流讨论。

(5) 内部审定—2021.02.21~2021.03.20

完成初稿后，全体参编人员利用 4 周时间对文件进行内部审读讨论，并统一修改完善。

(6) 专家委员会审议—2021.03.20~04.15

提交专家委员会审议，反馈修改意见

(7) 修改完善—2021.04.15~05.15

根据反馈意见，编写工作组进一步完善编写内容，完成最终稿；

(8) 定稿发布—2021.06

完成编写任务，定稿发布。

附录 1 坐标系定义

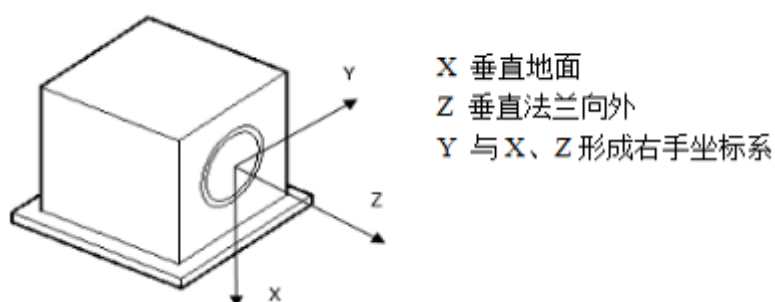


图 1-1 试验台坐标系示意图

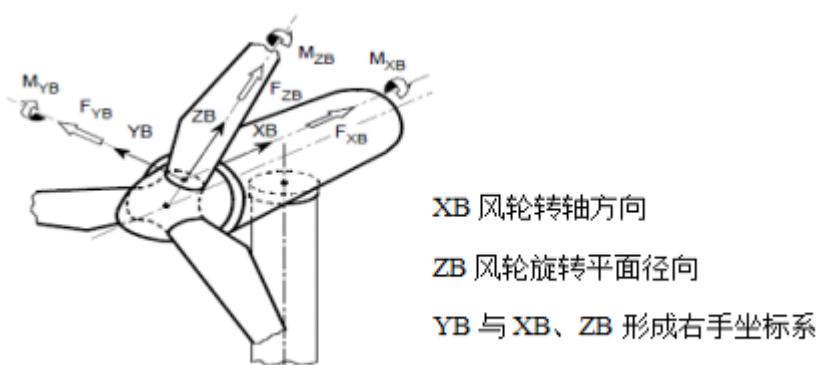


图 1-2 叶片坐标系示意图

附录 2 叶根安装方式

叶片力矩施加由叶片提供实验室负责进行，需要满足以下要求：

叶根力矩施加方式：米字型施加。

先用电动扳手将螺栓逐个的拧紧，再用液压力矩扳手打力矩，此时采用米字型打发；

- 先打 70%力矩；

将 1 号附近的螺栓打到 70%力矩，然后再将对角 47 号附近的螺栓打到 70%力矩，如图中箭头所示；当打完第一遍力矩时，叶尖的吊车要松开；

- 再打 100%力矩；

上一步结束后，按照以上顺序再将螺栓依次打满预紧力。第二遍力矩打完上半圈的时候，叶根部位的吊车松开。

力矩的大小要根据叶片的不同进行调整，并对所施加力矩进行记录。

附录 3 报告内容

测试报告至少需要包含以下内容：

1. 测试叶片描述：基本参数、安装方式、叶片状态（维修、配重等）；
2. 所选方法基本原理介绍；
3. 所选设备的基本型号、校准编号及不确定度等；
4. 实际测试方法：测试环境、设备安装、信号采集方法等；
5. 数据处理方法介绍；
6. 结果分析；
7. 不确定度分析；
8. 测试偏离项；

风电叶片测试创新发展中心工作平台地址：

<http://weec.cgc.org.cn/>

网站二维码地址



备注：专家可通过预留手机号登录工作平台，登录初始密码：123456