基于激光跟踪仪的风电叶片智能检测技术及应用

海克斯康测量技术（青岛）有限公司移动式测量事业部 赵亚琦

针对风电叶片检测，提出了采用海克斯康 Leica 激光跟踪仪与大尺寸曲面扫描测量技术的检测方案，并将该技术应用到实际项目中，案例分析表明，该检测系统易于操作，受现场环境的限制较小；同时测量方式具有较高的检测精度与检测效率，可以实现自由曲面叶片的智能检测。

一、引言

近年来石油、煤炭等传统资源日益枯竭，同时传统资源的大量燃烧所带来的环境污染问题也日益严重，开发风能、太阳能等可再生性新能源是当今世界能源发展的趋势。风能是由于地表因接受太阳能能量不同，各处空气温度不同，造成空气流动而形成的动能，是一种清洁无污染的可持续性再生能源，在技术成熟度、开发利用前景及经济效益等方面具有一定优势，是当今新能源开发的一大热点。目前，我国的风电技术发展迅速，装机总量不断增长，单机容量不断上升。

风力发电系统主要包括风轮（叶片、轮毂）、风轮轴、调速装置、发电机和控制系统等，其中，风轮收集风能的能力主要与叶片的扫略面积相关。风电叶片结构由根部、纵梁与外壳三部分组成，根部与轮毂相连接，纵梁主要起支撑、加强筋的作用，外壳则形成气动外形，是生成气动力的主要部件。叶片外形首先通过设计软件生成翼型曲线，并生成位于弦线坐标系下的坐标，通过旋转、平移与缩放转化为叶片坐标系下的各个截面翼型坐标；拟合各截面轮廓线，并通过截面曲线创建叶片外形型面，最后进行填充封闭处理，生成实体模型。从叶片外形的设计流程中可以看出，为了达到最佳的气动外形，在叶片的截面上设计了不同的弦长、翼型、厚度及扭转角等几何参数。叶片的截面形状直接影响叶片的实际型面轮廓、翼型的前后缘位置等关键几何参数，叶片截面轮廓是影响整体刚度与强度的关键因素，当加工精度不达标时，往往造成叶片根部及中部的断裂，因此，叶片轮廓形状精度对风电机组的性能及安全运行具有重要影响。当前，大型风电叶片体积庞大，对整体叶片进行测量势必会耗费大量的时间、精力，而测量翼型截面轮廓线不仅大大提高测量效率，同时测量数据可以比较全面地反映整体叶片信息。

叶片型面的成型质量一般通过较高精度的加工模具来保证，成型后采用标准样板比较法、电感测量法及三坐标测量机测量等方式对叶片的外形型面进行检测。标准样板比较法与电感测量法是基于模拟量传递的定性测量方式，依据经验判断产品是否合格，无法给出确切的数字量评价；采用三坐标测量机进行测量，可以保证较高的测量精度，但三坐标测量机对测量环境的要求，以及测量范围的限制不适用于大型的风电叶片型面的检测。因此，大型风电叶片的检测需要一种高精度、高效率、测量范围广、适应于复杂自由曲面检测的新测量方案与技术。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

针对大型风电叶片外形的检测，本文提出一种基于激光跟踪仪的快速智能检测方案，实现大尺寸风电叶片的高效率、高精度现场检测。

二、激光跟踪仪扫描检测技术

风力发电机中叶片的设计直接影响风能的转换效率及年发电量，翼型作为叶片的气动外形，直接影响叶片对风能的利用率。好的翼型在设计工况下能够具有较高的升力系数和升阻比，而在非设计工况下具有良好的失速性能。

1. 传统叶片扫描检测的局现性

如图 1 所示风电叶片室外检测场景，叶片外形检测所面临的主要问题有：（1）传统的测量工具无法对大型风力叶片进行全面而有效测量；（2）风力叶片表面形状曲率较大，普通三维扫描仪设备无法进行精准的三维数据测量；（3）高精度的三坐标测量设备无法应用于现场环境，加之受测量范围影响，无法全截面及外形检测。

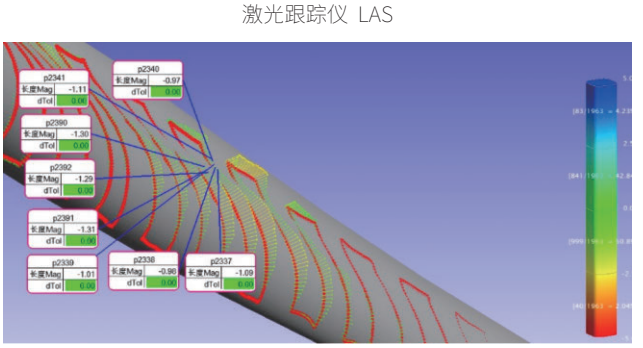
图 1 风电叶片检测场景

2. 新型检测系统组成及优势

Leica 激光跟踪仪与大尺寸曲面扫描测量方案由高精度、绝对便携的 Leica 激光跟踪仪和适用于大尺寸快速扫描的激光扫描仪（LAS/LAS-XL）以及数据处理软件组成。如图 2 所示。

该测量系统与传统的检测手段相比，有如下优势：（1）精度高：AT960 激光跟踪仪 ADM 全量程 0.01mm，LAS 测量不确定度为 60μm，LAS-XL 测量不确定度为 0.15mm；（2）测量范围广：AT960 激光跟踪仪有效测量范围为 160M，LAS-XL 单站位最大测量范围为 60M（直径），可以一次性扫描大部分叶片外形，有些中型叶片单个叶片甚至无需转站；（3）便捷性，环境适应性高：该测量系统安装携带方便，可以使用电池供电，可以直接应用于生产现场，户外风电场等环境；（4）不同于传统的风电叶片检测，测量时只需减少叶片自重与扭曲对翼型的影响，无需对叶片姿态的进行特别调整。通过调整激光跟踪仪的站位，可以方便地对不同类型、不同尺寸的叶片的全方位检测；（5）测量坐标系的建立不是必须的。可以直接进行测量，在扫描测量完成后快速与理论模型或者理论坐标进行对齐。也可以先建立测量坐标系再对叶片进行检测，能在一定程度上提高测量精度。

激光跟踪仪 LAS



处理软件

图 2 检测系统基本组成

三、检测方案应用

叶片结构与外形对发电效率的影响很大，因此对叶片实际外形的检测显得尤为重要。Leica 激光跟踪仪与 LAS/LAS-XL 结合的扫描方案克服了传统测量方案的局限性，有

着广泛的应用：（1）风电叶片的逆向造型；（2）检测成品叶片外形，与 CAD 数模比对，分析叶片翼型截面几何参数和误差情况；（3）可以用于生产车间叶片模具磨损的检测分析，及时更正加工误差来源；（4）能对风电场对使用后的叶片做变形量检测，用来分析其变形原因并用于指导设计。

1. 风电叶片逆向造型

对于没有理论数模以及需要反求理论模型的情况，测量分析软件提供了强大的逆向处理功能，可以实现风电叶片的逆向造型需求。得益于 AT960 激光跟踪仪内置高速工业相机实现实时快速跟踪和 LAS/LAS-XL 的快速点云扫描，可以获得客户实际建模所需三维点云数据，如图 3 所示，显示了叶片测量点云数据进行逆向建模的一般步骤，最终生成的 CAD 模型可用于后续叶片的设计。

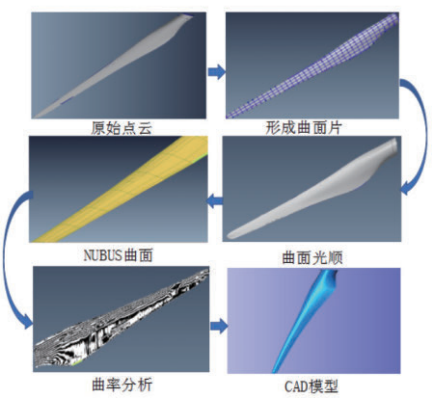


图 3 叶片点云逆向造型

2. 风电成品叶片及叶片翼型截面几何参数分析

对于有理论模型的风电叶片，简单快速的处理方式是将测量数据与理论数模对齐后，查询检测数据与理论模型之间的偏差，统计分析叶片的外形质量并进行三维可视化显示，如图 4 所示，可以十分清晰地看出叶片外形的整体趋势变化状况。

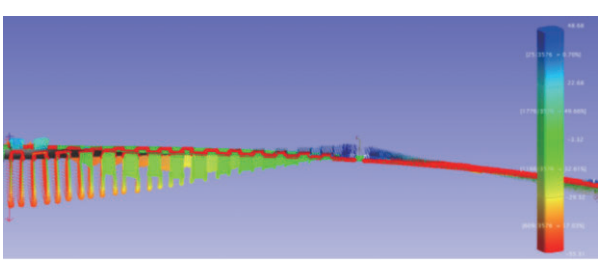


图 4 叶片整体趋势色差图

还可以根据需要对固定间隔的多个截面进行分析，查看截面分析结果，通过直观的色差图查看整体与局部的偏差情况。图 5 显示了整体叶片所测的各截面的分布状况。

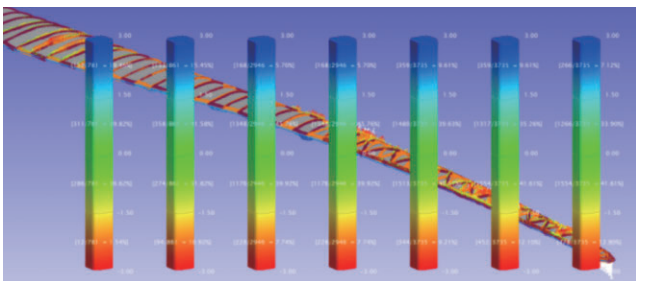


图 5 风电叶片各截面片分析

通过对每个截面的分析，得到叶片实际参数弧长，最大宽度，厚度以及进口与出口角度，进而对产品的后续优化起到了较好的指导作用，图 6 显示了分析软件可以实现叶片加工参数的快速获取与分析评价。

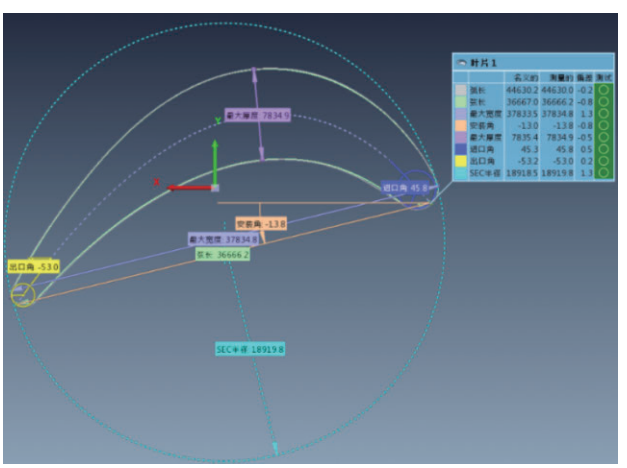


图 6 风电叶片几何参数

图 7 则详细显示了叶片截面偏差，充分显示了叶片的实际曲率变化，为叶片的性能分析与设计提供了参数依据。

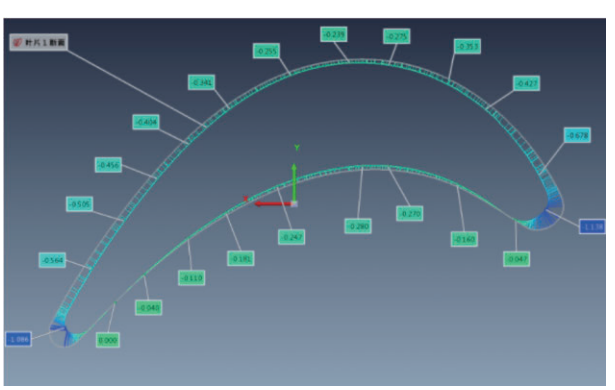


图 7 叶片截面线数据分析

3. 风电叶片制造模具磨损分析

风电叶片制造模具在长期使用后会产生磨损，导致生产

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

的叶片质量受到影响。因此需要对模具磨损情况做定期检查。仪器每秒钟 3000Hz 的采样频率，移动速度大于 4m/s，65m 长的大叶片，短短 30 分钟即采集了百万数据点，几乎覆盖了整个叶形。图 8 显示了叶片模具检测。

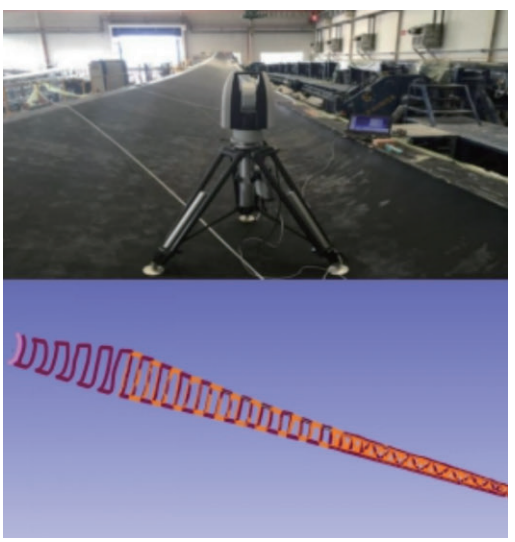


图 8 叶片制造模具检测

通常情况下，测量得到数据之后，使用快速与 CAD 对齐功能使仪器坐标和叶片设计坐标粗对齐，然后用最佳拟合精确找出坐标系，将测量数据与模具数模进行对比，如图 9 所示。

有时则要求使用模具根部对齐看前端变形，或者使用前端对齐看根部变形量等，对于这种情况，只需要改变一下原始数据的对齐模式，不需要二次测量，数据及报告可以自动更新，如图 10 所示。

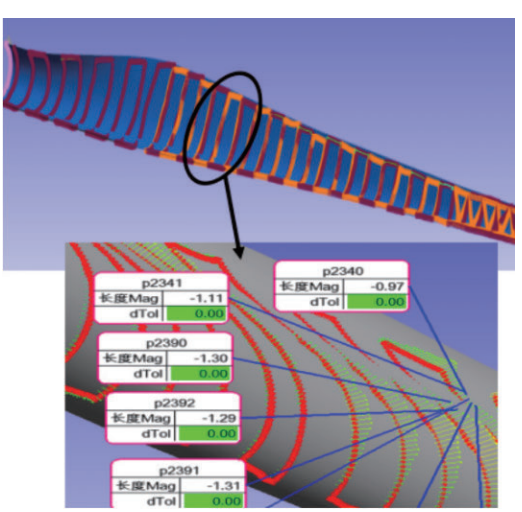


图 9 数据对齐与适量偏差

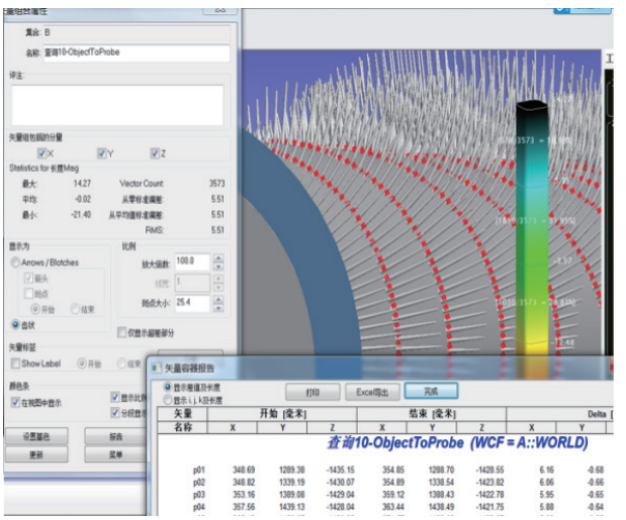


图 10 拟合自动更新与快速报告

四、结语

本文提出了基于激光扫描测量的风电叶片智能检测技术，有效地解决了风电叶片检测的技术难点，不仅实现了高精度、高效率的检测，同时测量数据的快速分析处理可以满足实际工程需求。实际应用分析表明该检测技术具有极高的应用价值。