

风力机叶片参数化有限元建模

齐沛玉

(北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100176)

摘要: 研究了叶片参数化建模的方法,从气动设计开始,将叶片的翼型、气动外形、部件定位数据、材料、铺层等信息进行参数化。通过本文研究的方法,计算得出叶片有限元模型需要的节点、单元和铺层数据,实现了自动化参数建模,经验证其结果快速准确,提升了叶片有限元分析效率。

关键词: 风力机叶片; 参数化建模; 有限元分析; 自动网格生成

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-8000(2020)01-0082-05

1 前言

风力机叶片作为风力发电机的核心部件,其结构设计的一个关键步骤是使用有限元方法分析叶片的模态、强度、稳定性等项目^[1,2]。目前叶片有限元建模方法均采用网格和铺层信息分离的做法^[3]。叶片几何外形采用三维造型软件生成,再根据部件位置及铺层特点进行区域划分,之后在专门的网格处理软件或有限元软件中生成结构化网格,再利用有限元软件命令(如 ANSYS ©命令流 APDL 语言)或编程处理^[4,5],生成各区域或网格的铺层信息。其中 3D 外形的分区和铺层信息映射最为耗时,而且依赖于结构分析人员的经验。随着叶片的不断大型化以及成本压力的增加,叶片结构设计不断精细化,铺层越来越复杂,局部结构增强越来越多。使用传统的建模方法极为耗时,同时局部网格的精细化要求也加大了网格的数量。为提升建模的效率,使用参数化输入依据一定的原则和流程自动生成有限元模型的方法目前备受结构设计人员的青睐。

文献[6]提出了一种叶片有限元网格的生成方法,根据结构特点将叶片分成若干区域,为捕捉各种结构细节,网格也分成了很多区域,特别是翼型后缘区域,铺层较为复杂,包含了后缘梁、后缘腹板、内外补强以及粘接胶等结构,极易形成区域交叉的现象,难以形成有效的网格。文献[7-9]都提到了在有限元软件中采用命令流的方式建模,其都依赖于已有的网格或分区,如果外形或结构形式发生变化,需要重新进行校对更改,在结构优化设计中降低了效率,

而且依赖专用的软件。

本文结合叶片设计的过程,从叶片的气动设计开始,综合翼型数据、气动设计外形以及部件位置及铺层、材料等信息,作为初始参数,进行参数化建模,研究自动生成有限元模型的方法,最终输出所需要的材料、节点、单元和铺层信息,模型不依赖三维建模软件和有限元软件,可根据有限元软件的格式要求,直接生成所需模型,用于结构分析和计算。在保证网格质量的前提下,根据铺层信息自动计算每个单元的铺层信息,可大幅缩短叶片有限元建模的时间,提升叶片优化设计效率。

2 叶片结构

叶片结构可以有很多形式,例如 D 型梁、箱形梁等。本文以典型的叶片结构形式为例展开研究,其包含主梁帽(Spar Cap)、后缘梁(Treading Edge Spar Cap)、主腹板(Spar Web)以及后缘粘接板(Treading Edge Bonding Clamp)等部件,其截面构造示意如图 1 所示。

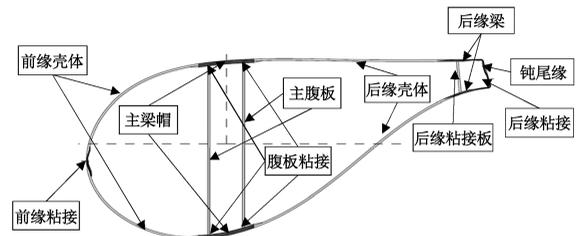


图 1 叶片结构剖面示意图

Fig. 1 Structure sketch of blade section

其中各部件的主要功能为:叶片壳体提供叶片外形,承担剪力及扭转载荷;叶片主梁帽承担挥舞方向弯矩;主腹板支撑主梁帽,承担部分剪力;后缘梁承担摆阵方向弯矩;

后缘粘接板、前后缘粘接、腹板粘接区域粘接上下壳体及腹板部件。

3 参数化有限元建模流程

参数化建模从叶片的气动设计输出开始,将所有数据参数化,形成输入文件,包含翼型、气动设计数据、网格参数、部件定位数据、铺层数据、材料数据等,通过编程计算,形成最终的有限元模型,其流程如图2所示。

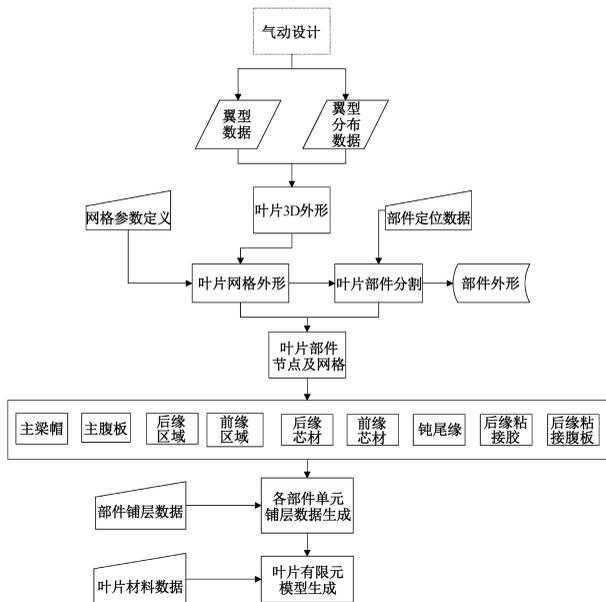


图2 有限元参数化建模流程

Fig. 2 The parameterized FEM model building process

4 叶片外形生成

叶片外形由叶片标准翼型以及气动设计输出通过计算得到。通过气动设计,输出叶片在展向的弦长、扭角、相对厚度、叶片弦向和厚度方向的定位数据等分布数据;叶片截面翼型数据通过标准翼型插值得到,根据气动设计输出,通过坐标变换得出叶片截面在空间的坐标点。叶片三维外形由截面翼型曲线放样生成。叶片载荷坐标一般采用GL标准^[10]规定的叶根坐标系,叶片外形坐标系采用与其相同的原点,为与叶片模具摆放姿态一致, X 坐标系由前缘

指向后缘, Y 坐标系由PS指向SS,如图3所示。

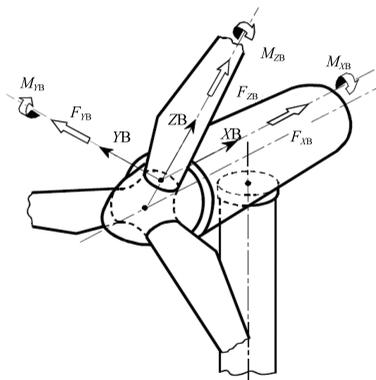


图3 叶根坐标系

Fig. 3 Blade root coordinate

有限元网格的选择采用同样的方法,根据网格的大小,将叶片在长度方向上离散,确定网格在长度方向上的占位,生成每个截面在叶片展向的外形坐标。为保证叶片外形的光顺,在进行翼型插值以及气动外形插值时,应采用样条曲线进行插值,使网格在弦向和展向光滑过渡,避免由于外形造成局部的应力集中。

5 叶片分区及网格生成

按照叶片的外形及部件可以将叶片分成如图4所示的几个区域。其中将后缘区域看作一块整体,其宽度覆盖后缘UD及其倒角区域,根据单元的位置判定其铺层,避免了网格分区形成交叉。

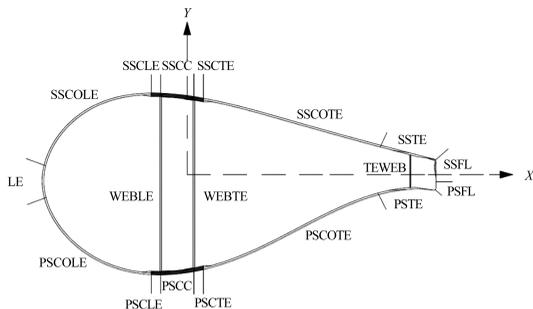


图4 叶片截面区域分割

Fig. 4 Region definition of blade section

5.1 部件定位

根据叶片的部件区域划分,需要定义每个部件在叶片展向的定位数据。关键的定位数据包含主梁帽中线位置、翼型前缘及后缘分模位置。

主梁帽中线在结构设计中确定,一般通过叶片

尖部或根部两个点确定的竖直面形成,或者在此基础上旋转一定的角度,因此可以通过平面与截面翼型的交点,确定主梁帽中线在壳体上的投影位置。

叶片前缘分模线一般位于模具姿态下翼型 X 坐标最小位置,为保证前缘分模线的精确以及光滑,可以在前缘位置约 5% 的范围内进行加密,取最小 X 坐标值点作为前缘点。

叶片后缘分模线通过分模位置距离翼型后缘点的距离来确定。

以后缘分模点作为参考,通过计算每个截面节点到参考点的距离 L ,可以确定每个节点到后缘分模点的距离,进而得出每个网格中点距离后缘分模点的距离,作为判定弦向铺层的依据。

$$L = \int_{i1}^{i2} \sqrt{X^2 + Y^2}$$

5.2 壳体网格生成方法

叶片壳体三维外形是比较连续的,将每个截面都按区分割后,根据铺层的要求和复杂程度定义不同的网格数量。在主梁帽以及前后缘芯材区域,弦向铺层变化不大,叶片铺层主要沿展向厚度发生变化,因此网格数量要求较少,网格尺寸保持在 50 mm ~ 100 mm。在叶片前后缘区域,铺层较多,厚度和弦向变化较多,包含蒙皮、增强铺层、粘胶剂、内外补强以及局部加强等铺层,可定义较多的网格数量,网格尺寸控制在 10 mm ~ 30 mm,保证较高的弦向精度。将插值节点在弦向和轴向按顺序连接形成规则的单元。

为保证单元方向的准确性,可以将单元弦向的边线作为参考轴,通过定义纤维与参考轴的夹角定义铺层纤维方向,叶片展向直接定义为 90° 方向,由于单元弦向边界上 Z 值相同,因此与叶片展向一致,如图 5 所示。

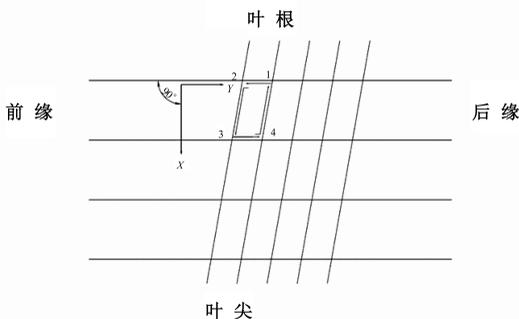


图 5 壳体单元方向

Fig. 5 Shell element direction

5.3 腹板网格处理方法

腹板区域一般在起始位置需要进行刚度过渡,形成半圆形或椭圆形的空腔区域,其网格难以通过简单的插值方法得到,需要建立一定的规则保证好的网格质量,如图 6 所示,同时需要建立局部坐标系,保证纤维方向与叶片展向一致。

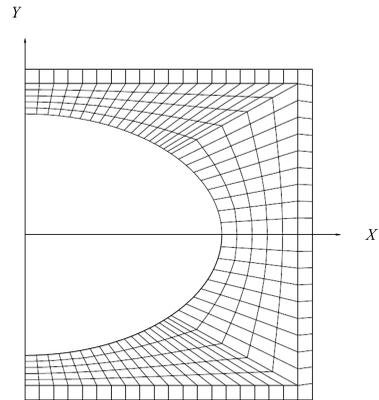


图 6 腹板起始位置网格划分

Fig. 6 Element generation of shear web starting area

6 铺层定义

单元生成之后,需要确定的就是单元包含的铺层信息,主要包含铺层顺序、材料型号、厚度、纤维方向等,根据每个单元在展向以及弦向的位置和输入的部件铺层信息,可以确定每个单元的数据,生成单元铺层信息,形成数据矩阵。

在弦向存在倒角的位置,通过输入倒角的起始位置、铺层厚度以及倒角大小等数据,可以计算出每个单元中心位置的厚度作为单元的铺层厚度,如图 7 所示,其精度可以达到 1/2 单元大小。

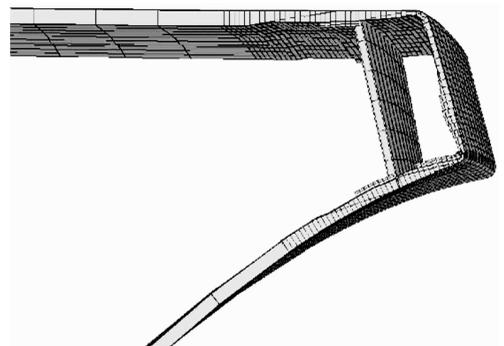


图 7 铺层倒角区域单元厚度

Fig. 7 Element thickness distribution at chamfering area

- [6] 黄辉秀. 一种快速生成风电叶片有限元网格的方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(1): 83-85.
- [7] 傅程, 王延荣. 风力发电机风轮叶片三维有限元建模研究[J]. 机械设计, 2009, 26(9): 50-53.
- [8] 陈进, 马金成, 汪泉, 等. 基于 ANSYS 二次开发的风力机叶片结构优化设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(7): 895-900.
- [9] 张军, 武美萍. 大型风力机叶片有限元建模研究[J]. 机械设计与制造, 2013, 42(4): 24-27.
- [10] DNV GL. DNVGL-ST-0376: Rotor blades for wind turbines[S]. DNVGL, 2015: 16.
- [11] ANSYS Inc. Product PDF Documentation for Release 15.0[Z].
- [12] Chen J, Wang Q, Shen W Z. Structural optimization study of composite wind turbine blade[J]. Material & Design, 2013, 46: 247-255.
- [13] 马金成. 基于参数化建模的风力机叶片结构分析及优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [14] Zhu J, Cai X, Rongrong G U. Aerodynamic and structural integrated optimization design of horizontal-axis wind turbine blades[J/OL]. Energies, 2016, 9: 66. <http://www.mdpi.com/journal/energies>. DOI:10.3390/en9020066.
- [15] 郑玉巧. 大型风电机组柔性叶片的结构优化设计方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.

PARAMETERIZED FEM MODEL GENERATION OF WIND TURBINE BLADE

QI Pei-yu

(Beijing Goldwind Science & Creation Windpower Equipment Co., Ltd., Beijing 100176 ,China)

Abstract: When wind turbine blade becomes bigger and bigger, we need more optimization of blade design which requires fast generation of FEM model. The parameterized method could generate blade model quickly and accurately, which is explored in this paper. From aerodynamic design, the aerofoil data, blade shape layout, component positioning data, material performance, lamination plan and etc information are parameterized. After research, we can calculate the nodes, elements and lay-out data required by FEM model. Finally, the formatted data for FEM software could be generated automatically.

Key words: wind turbine blade; parameterized model; FEM analysis; automatic mesh