



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业论文

小型风电机组的叶片设计

Blade design for small wind turbine

姓 名	杜德仕
学 院	能源工程学院
专 业	能源与动力工程
指导教师	冯红岩
职 称	高级工程师
完成时间	2023年5月27日

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘要

风能作为当今世界绿色能源之一，在国家突出强调环保的背景下，开发利用风能是必然趋势。风电机组作为风能捕获转化装置，提高风机转化效率是目前需要攻克的难关，其中叶片是风机机组中具有捕风作用的重要部件，高效的风机叶片可以大幅度提高风能转化利用效率。故研究小型风电机组叶片设计极具意义。针对风机叶片结构改进，本文将通过改变叶片材料以及对叶片结构进行优化进而获得具有良好空气动力学性能的风机叶片。

首先熟悉了解叶片相关理论知识、翼型相关基本概念。选定翼型并通过翼型软件分析比较不同翼型在同一个雷诺数下和每种翼型在不同雷诺数和不同攻角下的数据，并对其分别进行受力分析、升力系数、阻力系数、力矩系数、升阻比等特性的对比分析，以此选定最优翼型、最优攻角、最佳叶尖速比等，并进行扭角计算，设计叶片的外形。并根据以上数据通过 SolidWorks 三维建模软件对所设计叶片进行三维建模。

小型风电机组相比大型风电机组具有面积小、维修方便等特点，其更适合应用于空间具有局限性的地方，同时其可作为风力发电机组科研教学的实验设备，故对小型风电机组叶片的设计是极具意义的。

关键词：风电机组；叶片；翼型；转化效率；对比分析

ABSTRACT

As one of the green energy sources in the world today, wind energy is an inevitable trend in the context of environmental protection. Improving the conversion efficiency of wind turbines, such as wind energy capture and conversion equipment, is a part of overcoming difficulties. Among them, blades are an important component of wind turbines, with capture function and efficiency. High fan blades can greatly improve wind energy conversion efficiency. Therefore, studying the blade design of small wind turbines is very important. Aiming to improve the structure of fan blades, by replacing material blades and improving blade structure, fan blades with good aerodynamic performance can be obtained.

Firstly, you should be familiar with code with theoretical knowledge and possess relevant basic concepts. Select a software carrier for analyzing and comparing data from different carriers with the same number of Reynolds, different numbers of Reynolds, and different attack angles, and perform strength analysis, increase resistance coefficient, and coefficient timing separately. Improve resistance ratio, etc. to select the optimal support, attack angle, torsion angle, and speed ratio recommendations. Based on the above data, Solidworks 3D modeling software drew the code design.

Compared with a wide variety of wind turbines, small wind turbines have advantages such as small area and easy maintenance, making them more suitable for applications in space limited areas. At the same time, they can be used. The experimental equipment used for researching and teaching wind turbines is therefore very important in the design of small wind turbines.

Key words: Wind turbine; Blade; Airfoil; Conversion efficiency; comparative analysis

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 课题研究内容	2
第二章 小型风电机叶片设计理论	3
2.1 翼型及其有关特性	3
2.2 风轮设计参数的确定	5
2.3 翼型选取	5
第三章 叶片结构设计要求	12
3.1 叶尖速比和叶片数目	12
3.2 叶根至叶尖各处弦长计算	12
3.3 翼型截面弦长计算	14
第四章 风机叶片 3D 模型设计	16
4.1 叶片 3D 模型设计要求	16
4.2 叶片的 3D 图形绘制	16
4.3 叶片与轮毂连接柄耦合	17
第五章 总结与展望	18
5.1 总结	18
5.2 展望	18
参考文献	19
致 谢	20

第一章 绪论

1.1 课题研究目的和意义

相比于传统的化石能源，风能作为取之不尽，用之不竭的绿色环保可再生能源，在当今世界传统能源资源稀缺，全球大力寻找发展新型能源，国家提倡的“双碳计划”以及国家能源局、科学技术部近日印发的《“十四五”能源领域科技创新规划》中已明确了能源技术革新的主要目标在发展先进可再生能源、建设先进电力系统等新领域中，在国家科技路线图的大背景下，风能的发展与利用以及风力发电技术必然是未来的趋势。我国一直积极发展风能利用技术，目前大型风电设备的设计与制造已经达到世界水平，风电机组装机容量世界第一。但业内对微小型风电机组的技术投入一直非常低，导致微小型机组的风能转化效率非常低，使用户非常失望，最后沦为景观式形象工程的微小型风电设备非常多。但随着分布式发电的发展，小型风电设备因其占地面积小，能量密度相对较高等特点，仍是分布式电源不可或缺的备选项。因此，需要积极进行微小型风电设备的优化设计，提高其风能转效率，使其能高效可靠的发电，提高竞争力。风力发电设备中最关键的部件就是叶片；提高风机叶片转化效率是提高风能利用率的根本，因此开展对小型风电机组的叶片设计具有重要的现实意义。

小型风电机组与大型风电机组不同，塔架高度相对很低，工作周围地表环境复杂，风速受地表特性干扰造成的湍流强度很大（据统计在 0.3~0.4 之间）。目前大部分风电叶片翼型都是为大型风电机组设计的，这些翼型对湍流强度非常敏感，湍流强度每增加 0.01 都会导致机组风能转化效率显著降低，疲劳载荷显著增加（IEC61400-1 规定：大型陆上风电机组的湍流强度按 0.18 设计，海上按 0.16 设计）。如果沿用大型风电机组的翼型将使得微小型风机的风能转化效率大打折扣。本课题通过对小型风力发电机的叶片进行优化改进，使其满足机械强度要求的同时，提高叶片的风能转化效率，降低对湍流强度的敏感度。使其在高湍流强度下仍然保持较高的转化效率，进而提升小型风电机组的风能利用效率。

1.2 国内外研究现状

国外许多国家研制出了各自专用的风机翼型系列，李银然曾在《风力机专用翼型的空气动力特性研究》^[1]中提到多种国外翼型，其中最为出名的例子应属于美国国家航空航天局 NASA 研制的 NACA 翼型，NACA 翼型自推出至今，经过多年的发展已经成为了世界公认的优秀翼型系列之一。

国内由于研究发展风力发电技术较晚，相比于发达国家存在一些差距，但近些年在国家的大力支持，科研人员的不断努力下，我国在风机翼型设计及叶片结构优化上取得了较大的突破。其中李宏利在《水平轴风力机专用翼型族的设计及其气动

性能研究》^[2]设计了 CAS-W1-XXX 风力机专用翼型族，吴江海在《大型风力机叶片及翼型优化设计》^[3]通过以翼型优化为基准，改进提高叶片性能为目标，设计出一族新翼型，并同时完成了风机叶片优化。我国在风机叶片材料改进方面同样取得较大进步，其中汪泉在《风力机叶片气动外形与结构的参数化耦合设计理论研究》^[4]通过设计改良使得风机叶片更加轻盈，材料成本更低，并且使得叶片疲劳寿命提高。

针对低雷诺数下的流动情况，各国学者分别进行了多项实验。刘强等^[5]运用低雷诺数风洞和流动显示技术相结合的方法对 FX63-137 翼型的流动性进行了分析，其结果表明，流场结构的变化会导致层流分离泡的产生。黄宸武等^[6]则通过对 S809 翼型在不同低雷诺数下进行气动特性分析，表明低雷诺数下产生的层流分离泡是影响翼型空气动力学性能的主要原因。薛丁云等^[7]对 DU91-W2-250 翼型采用压力测量的研究方法研究了在雷诺数 $1.0 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^5$ 的气动特性，其结果表明，雷诺数数值越低，发生层流分离的攻角越小。

1.3 课题研究内容

本课题来源于新能源教学设备开发方向的横向课题，在设备研制中了解到目前小型和微型风力发电机组(以下简称小风机)的效率非常低。该问题影响了小风机的使用和发展，使小风机的安装只是作为一种景观而已，人们没有感受到风力发电带来的实质收益。通过测试和试验发现，造成效率低下的主要原因是小风机的叶片采用薄片结构，没有使用升阻比优化设计的空气动力学翼型，使得叶片将风能转化为叶片的旋转动能的效率很低。

本文通过参考查询相关资料，通过计算确定风轮各部分数据，如风轮直径、扭角弧度、最优攻角等参数。并通过对比分析三种弦厚比较大的翼型，确定最优翼型并设定为本设计的设计翼型。最后通过 SolidWorks 三维建模软件对所设计的叶片进行三维建模。

第二章 小型风电机叶片设计理论

2.1 翼型及其有关特性

(1)翼型的几何参数:

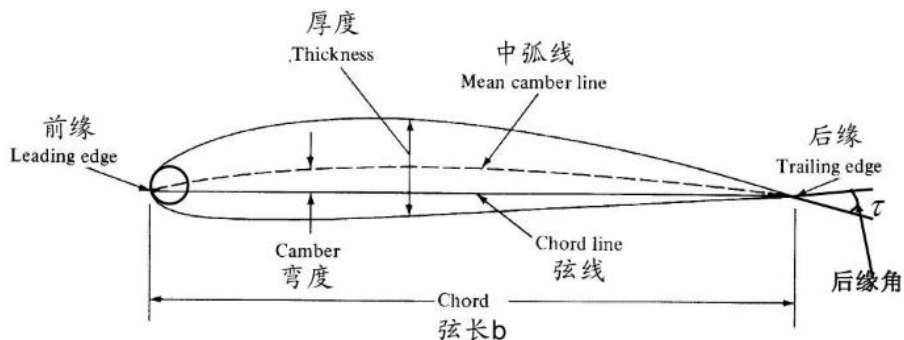


图 2-1 翼型的几何参数

风机叶片翼型的几何外形通常由以下几个参数决定^[8]

1. 翼型前缘：翼型前部的圆头部位称之为翼型前缘；
2. 翼型后缘：翼型尾部的尖端部分称之为翼型后缘；
3. 翼型弦线：翼型前缘与后缘之间连线的距离称之为翼型弦线，弦线的长度即为翼型的弦长，同时弦线是翼型的特征尺寸；
4. 中弧线与弯度：翼型轮廓内所有内切圆圆心的连线称之为翼型的中弧线，中弧线与弦线之间最大的垂直距离称之为翼型弯度，弯度与弦长的比值称之为相对弯度；
5. 厚度：垂直于弦线，上下曲线之前的最大距离称之为翼型厚度，最大厚度与弦长比值称之为相对厚度，翼型的厚度与弯度是影响其气动性能因素之一。

(2)翼型的气动参数:

翼型攻角 α ：在翼型平面上，把来流风速 V 与弦线 C 之间的夹角称之为翼型攻角，又称为迎角。

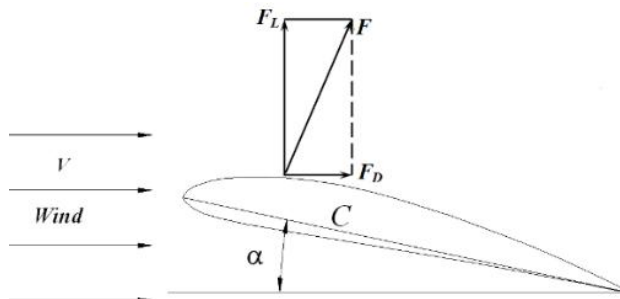


图 2-2 翼型的受力示意图

当翼型攻角 α 大于零的时候，翼型下表面的压力会大于翼型上表面的压力，导致气流在翼型上产生一个合力 F ，合力 F 就是翼型所受的空气动力，同时该合力 F 可

分解成两个分力；分别是 F_L 和 F_D ，其中 F_L 与气流方向垂直，称为升力； F_D 则与气流方向相同，称为阻力。

(3)升力、阻力、力矩系数定义：

分别假定用 V ， ρ ， C ， M 分别来表示来流速度，空气密度，翼型弦长和翼型的力矩，则翼型的基本空气动力学特性可以由以下无量纲系数来表示：

升力系数：

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 C} \quad \#(2-1)$$

阻力系数：

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 C} \quad \#(2-2)$$

力矩系数：

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 C} \quad \#(2-3)$$

(4)翼型升阻特性：

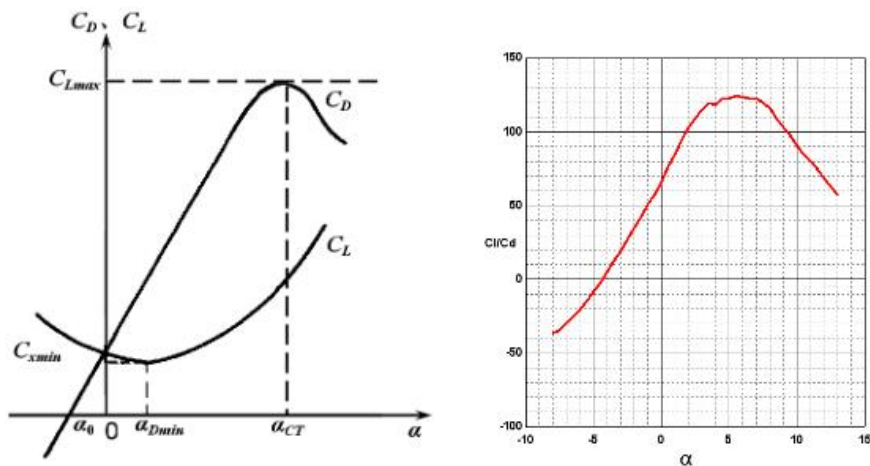


图 2-3 翼型升阻特性曲线

图 2-3 为某翼型在某一特定雷诺数下的升阻特性曲线，其中左图表示的是升力系数和阻力系数随攻角 α 的变化曲线，右图为升阻比随攻角 α 的变化曲线。在左图中可分析出在 α 数值处于较小的范围时， C_L 与 α 几乎呈现为线性关系，但当攻角 α 增大到临界值 α_{CT} 时， C_L 同时达到最大值，在此之后急剧下降，这是因为翼型上表面的气流在翼型前缘附近发生了分离现象，这种现象称之为失速现象^[9]。失速往往会导致风力机出现震动并伴随着巨大噪音，故为避免出现失速现象，通常避免选择失速点作为 C_L 值。在右图中可分析得到在 α 达到某一数值时， C_L/C_D 达到最大值，此时的攻角被称为最佳攻角，最佳攻角是风力机叶片的最优运行状态，通常选择最佳攻角作为设计攻角，并在通过控制使机组在额定风速以下时，运行在最优攻角下，确保机组的风能利用效率最高。

2.2 风轮设计参数的确定

风轮设计参数可根据以下流程进行计算：

(1)风轮功率 P 及设计风速 V:

本文设定最终成果为得到 100W 定桨失速型小风机的叶片实物，故额定功率设定，为 P=100W。设计风速的大小通常有风力发电机使用地点的风能资源来决定，风能资源通常则要考虑平均风速的大小以及风速的频度，通常根据全年获得能量最大的原则或年平均风速的大小来确定额定风速的大小^[10]，故本设计的额定风速设定为 V=8m/s。

(2)风能利用系数 C_p :

风能利用系数原则上是不能超过贝茨极限值 0.593，通常认为风能利用系数 C_p 在 0.4 之上即为比较理想的情况，故设定 C_p 预估值为 0.42。

(3)叶片长度计算:

风轮直径 D 可通过下述公式进行估算:

$$D = \sqrt{\frac{P}{C_p \eta \frac{\rho}{2} V^3 \frac{\pi}{4}}} = \sqrt{\frac{100}{0.42 \times 0.92 \times \frac{1.226}{2} \times 8^3 \times \frac{\pi}{4}}} \approx 1.1m \#(2-4)$$

风轮半径 R:

$$R = \frac{D}{2} = \frac{1.1}{2} = 0.55m \#(2-5)$$

其中:

η 为风力发电机机电效率，即风力发电机的总效率和风力发电机传动效率，此数值与传动系统配置和发电机系统相关，不同配置的风力发电机机电效率不同，本文预设 $\eta=0.92$ ，空气密度为 $\rho=1.226\text{kg/m}^3$ (密度大小根据温度为 15°C ，大气压为一个大气压情况确定)。

将设定数据代入上述公式计算得出风轮直径为 110cm，即风轮半径为 55cm。

2.3 翼型选取

风机叶片的气动性能主要是根据翼型的气动性能来确定的,所以,如何更准确地预估风力机翼型的气动性能,是目前设计较先进的风力机叶片必须克服的一个问题,同时对于风电结构的发展有着重大的意义。小型风力机由于轮毂安装位置较低,故常处于高湍流低雷诺数的状况下,所以本文设定为在高湍流低雷诺数($Re=10^4 \sim 10^5$)的情况下,但在低雷诺数情况下绕翼型的流动常伴有层流分离、分离泡和转捩等复杂现象,气动性能容易受雷诺数、表面粗糙度和湍流度等因素的影响^[12]。而处于高湍流环境在一定程度上可以提高翼型气动性能, Li Q^[13]等通过风洞试验研究不同湍流度对翼型 UMY02-T01-26 升阻力系数和压力分布的影响。结果表明,与较低的湍流度相比,高湍流流场中升力系数显著增加。李帝辰^[14]等通过对比分析得出阻力系数在

较小雷诺数下，高湍流强度具有明显的减阻效果，升阻比也有类似的复杂规律，高湍流强度可以大幅度提高翼型升阻比。

由于本文设定小型风力机在低雷诺数下运行，其流动尺度相对较小，故需要采用厚度较薄弯度较大的专用风力机翼型，厚度较薄弯度较大的特点可以保证翼型在低雷诺数下仍具有高效的特点，所以为保证所选翼型在低雷诺数，高湍流强度的条件下仍能保持较高效率，需选择弦厚比较大的翼型。故通过 **profil** 软件筛选三种弦厚比较大的分析，最终选取最优翼型作为本设计翼型。三种翼型分别为 GOE 433 翼型、GOE 434 翼型、GOE 435 翼型，对其在同一雷诺数下进行升阻比、升力系数、阻力系数、力矩系数对比分析，雷诺数数值分别设定为 100000、200000、300000、400000，其它设定参数均设置一致，分析情况如下。

雷诺数为 100000 时三种翼型数据对比情况：

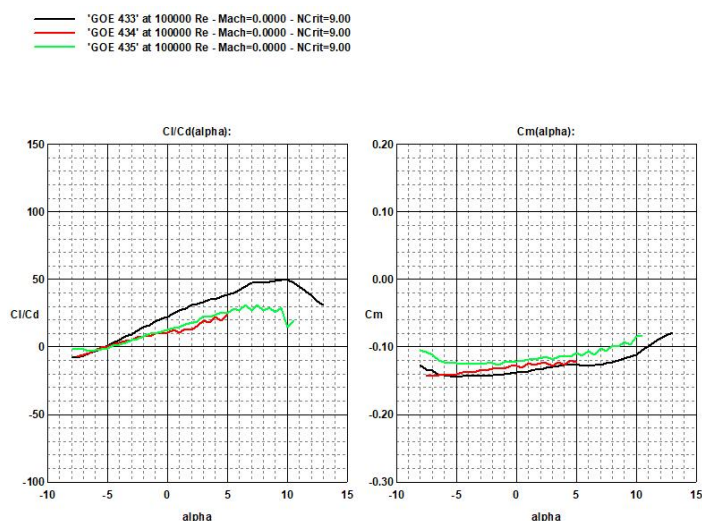


图 2-4 雷诺数为 100000 时三种翼型在不同攻角下与升力系数和阻力系数关系图

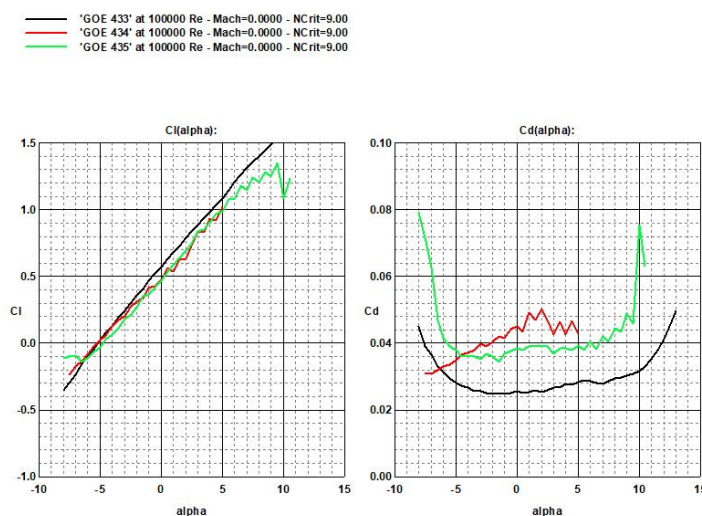


图 2-5 雷诺数为 100000 时三种翼型在不同攻角下与升阻比和力矩系数对比图

由以上数据得出在雷诺数为 100000 时:

(1)随着攻角由 $-10.0^{\circ}\sim 15.0^{\circ}$ 区间内逐渐增大的过程中,三者升力系数整体均呈现逐渐变大趋势,其中 GOE 433 翼型表现最佳,GOE 435 翼型表现其次且失速攻角为 9.5° ,GOE 434 翼型表现最差。而对于阻力系数,GOE 433 翼型与 GOE 435 翼型均整体呈现先减小然后趋于平稳最后增长趋势,且二者均在攻角为 $-7^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 时呈现平稳趋势的原因可能为此时正处于附着流区,翼型表面的流体尚未发生分离现象,此时由于压差阻力较小,翼型的阻力主要由摩擦阻力造成,故在此区间内,阻力系数随风攻角 α 的改变变化较为平缓。二者均呈现在攻角为 9° 时阻力系数迅速变大,其原因可能为翼型表面的流体出现边界层分离情况,使得压力阻力变大摩擦阻力减小,最终导致阻力系数增大。GOE 434 翼型则呈现为先增后减趋势,其中 GOE 433 翼型表现最佳,GOE 434 翼型表现其次,GOE 435 翼型表现最差。故在雷诺数为 100000 的条件下,GOE 433 翼型更适应此低雷诺数高湍流的状态,GOE 434 翼型适应程度较差,GOE 435 翼型适应程度最差。

(2)随着攻角由 $-10.0^{\circ}\sim 15.0^{\circ}$ 区间内逐渐增大的过程中,三者升阻比整体均呈现先增后减趋势,其中 GOE 433 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 10° 、GOE 434 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 5° 、GOE 435 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 6.5° ,综合来看 GOE 433 翼型表现最佳,GOE 435 翼型表现其次,GOE 434 翼型表现最差。而对于力矩系数,GOE 433 翼型与 GOE 435 翼型均整体呈现先减后增趋势,GOE 434 翼型则呈现为逐渐增加趋势,且三者数值范围均在 $-0.15\sim -0.08$ 之间,其中 GOE 435 翼型力矩系数最大,GOE 434 翼型其次,GOE 433 翼型最小。

雷诺数为 200000 时三种翼型数据对比情况:

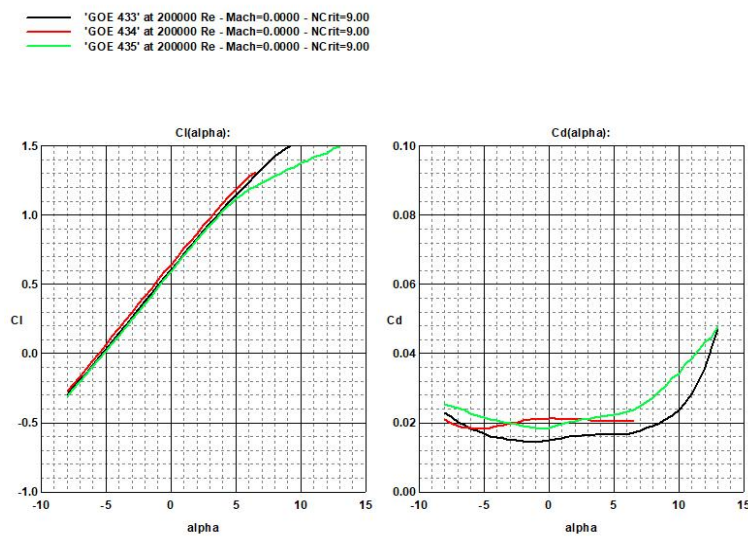


图 2-6 雷诺数为 200000 时三种翼型在不同攻角下与升力系数和阻力系数关系图

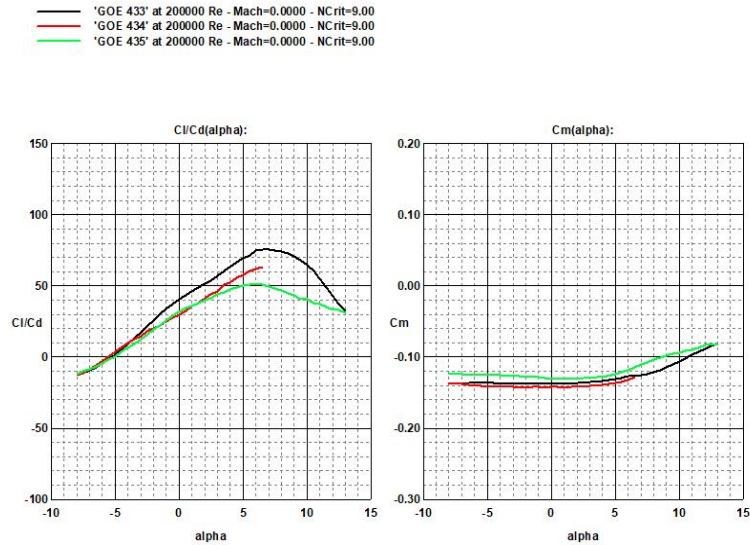


图 2-7 雷诺数为 200000 时三种翼型在不同攻角下与升阻比和力矩系数对比图

由以上数据得出在雷诺数为 200000 时:

(1)随着攻角由 -10.0° ~ 15.0° 区间内逐渐增大的过程中,三者升力系数整体均呈现逐渐变大趋势,其中 GOE 433 翼型、GOE 435 翼型表现较好,GOE 434 翼型最差。而对于阻力系数,GOE 433 翼型与 GOE 435 翼型均整体呈现先减小然后趋于平稳最后增长趋势,二者均呈现在攻角为 7° 时阻力系数迅速变大,其原因可能为翼型表面的流体出现边界层分离情况,使得压力阻力变大摩擦阻力减小,最终导致阻力系数增大。GOE 434 翼型则呈现为先减后增并趋于平稳趋势。三者均在攻角为 -4° ~ 7° 时呈现平稳趋势的原因可能是因为此时正处于附着流区,翼型表面的流体未发生分离现象,此时由于压差阻力较小,翼型的阻力主要由摩擦阻力造成,所以在此区间内,阻力系数随风攻角 α 的改变较为平缓。其中 GOE 433 翼型表现最好、GOE 434 翼型表现较好,GOE 435 翼型表现最差。故在雷诺数为 200000 的条件下,GOE 433 翼型更适应此低雷诺数高湍流的状态,GOE 434 翼型适应程度较差,GOE 435 翼型适应程度最差。

(2)随着攻角由 -10.0° ~ 15.0° 区间内逐渐增大的过程中,三者升阻比整体均呈现先增后减趋势,其中 GOE 433 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 7° 、GOE 434 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 6.5° 、GOE 435 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 6° ,综合来看 GOE 433 翼型表现最佳,GOE 434 翼型表现其次,GOE 435 翼型最差。而对于力矩系数,三者均呈现先平稳后增长趋势,且三者数值范围均在 -0.15 ~ -0.08 之间,其中 GOE 435 翼型力矩系数最大,GOE 433 翼型其次,GOE 434 翼型最小。

雷诺数为 300000 时三种翼型数据对比情况:

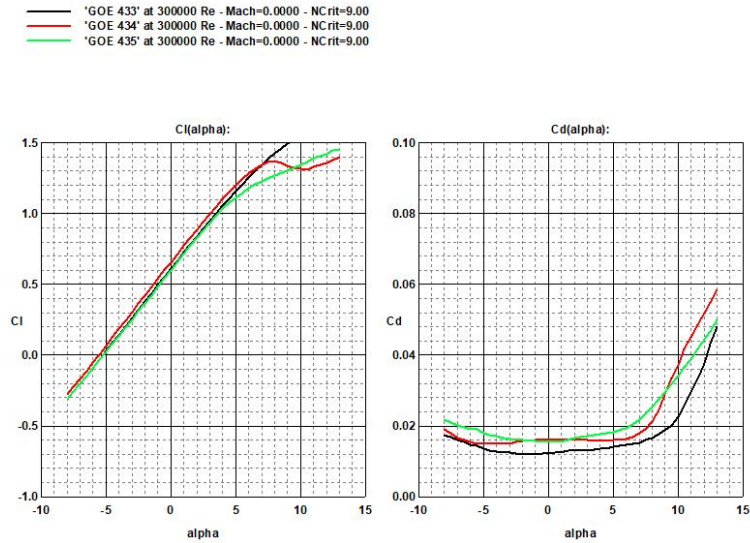


图 2-8 雷诺数为 300000 时三种翼型在不同攻角下与升力系数和阻力系数关系图

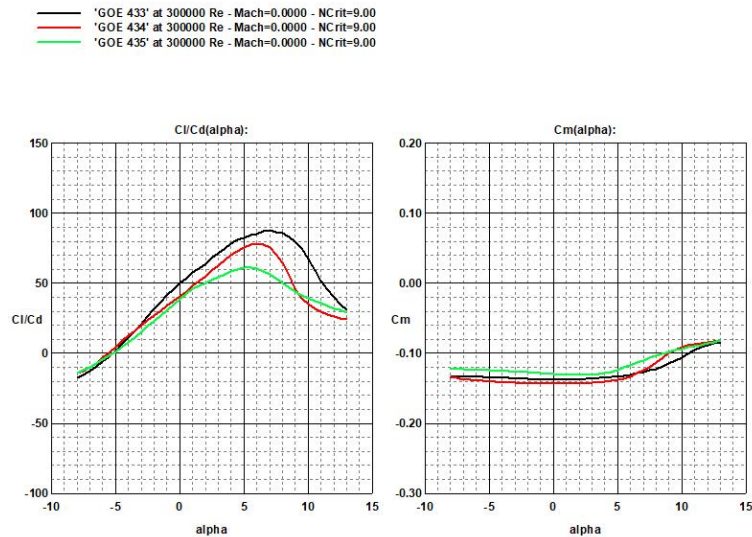


图 2-9 雷诺数为 300000 时三种翼型在不同攻角下与升阻比和力矩系数对比图

由以上数据得出在雷诺数为 300000 时：

(1)随着攻角由 $-10.0^{\circ}\sim 15.0^{\circ}$ 区间内逐渐增大的过程中，三者升力系数整体均呈现逐渐变大趋势，其中 GOE 433 翼型表现最好、GOE 435 翼型表现较好，GOE 434 翼型最差且失速攻角为 7.5° 。而对于阻力系数，三者均呈现先减小并趋于平稳后呈现增长趋势，三者均在攻角为 $-5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 时呈现平稳趋势的原因可能为此时正处于附着流区，翼型表面的流体未发生分离现象，此时由于压差阻力较小，翼型的阻力主要由摩擦阻力造成，所以在此区间内，阻力系数随风攻角 α 的改变趋势趋于平缓。三者均呈现在攻角为 7° 时阻力系数迅速变大，其原因可能为翼型表面的流体出现边界层分离情况，使得压力阻力变大摩擦阻力减小，最终导致阻力系数增大。其中 GOE 433 翼型表现最好、GOE 434 翼型表现较好，GOE 435 翼型最差。故在雷诺数为 300000

的条件下，GOE 433 翼型更适应此低雷诺数高湍流的状态，GOE 434 翼型适应程度较差，GOE 435 翼型适应程度最差。

(2)随着攻角由 $-10.0^{\circ}\sim 15.0^{\circ}$ 区间内逐渐增大的过程中，三者升阻比整体均呈现先增后减趋势，其中 GOE 433 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 7° 、GOE 434 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 6° 、GOE 435 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 5° ，综合来看 GOE 433 翼型表现最佳，GOE 434 翼型表现其次，GOE 435 翼型表现最差。而对于力矩系数，三者均呈现先平稳后增长趋势，且三者数值范围均在 $-0.15\sim -0.08$ 之间，其中 GOE 435 翼型力矩系数最大，GOE 433 翼型其次，GOE 434 翼型最小。

雷诺数为 400000 时三种翼型数据对比情况：

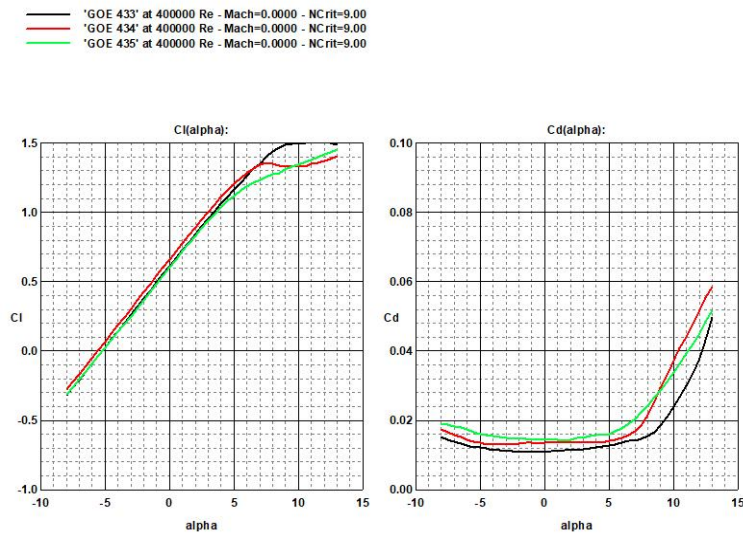


图 2-10 雷诺数为 400000 时三种翼型在不同攻角下与升力系数和阻力系数关系图

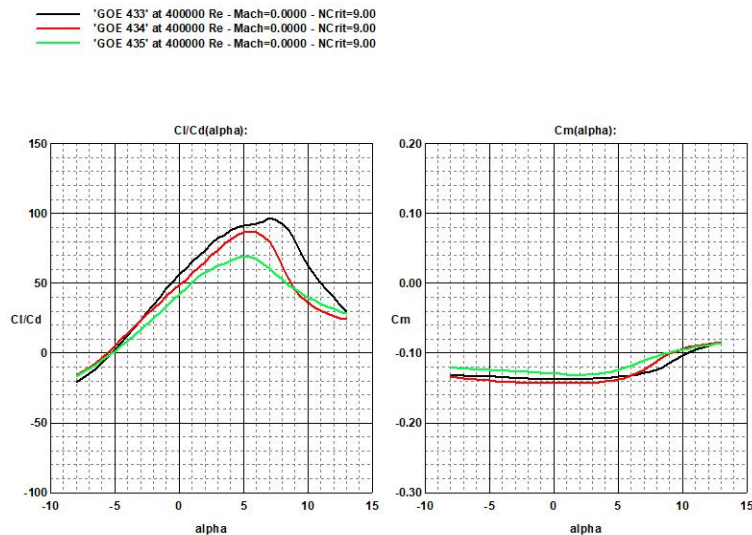


图 2-11 雷诺数为 400000 时三种翼型在不同攻角下与升阻比和力矩系数对比图

由以上数据得出在雷诺数为 400000 时：

(1)随着攻角由 -10.0° ~ 15.0° 区间内逐渐增大的过程中，三者升力系数整体均呈现先快速变大后缓慢变大趋势，其中 GOE 433 翼型表现最好、GOE 435 翼型与 GOE 434 翼型表现相差不大且 GOE 434 翼型的失速攻角为 7.5° 。而对于阻力系数，三者均呈现先减小并趋于平稳后呈现迅速增长趋势，三者均在攻角为 -6° ~ 7° 时呈现平稳趋势的原因可能是因为此时正处于附着流区，翼型表面的流体未发生分离现象，此时的压差阻力较小，翼型的阻力主要是由摩擦阻力引起的，所以在此区间内，阻力系数随风攻角 α 的改变变化很小。三者均呈现在攻角为 6° 时阻力系数迅速变大，其原因可能为翼型表面的流体出现边界层分离情况，使得压力阻力变大摩擦阻力减小，最终导致阻力系数增大。其中 GOE 433 翼型表现最好、GOE 434 翼型表现较好，GOE 435 翼型表现最差。故在雷诺数为 400000 的条件下，GOE 433 翼型更适应此低雷诺数高湍流的状态，GOE 434 翼型适应程度较差，GOE 435 翼型适应程度最差。

(2)随着攻角由 -10.0° ~ 15.0° 区间内逐渐增大的过程中，三者升阻比整体均呈现先增后减趋势，其中 GOE 433 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 7° 、GOE 434 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 6° 、GOE 435 翼型的最佳升阻比存在于攻角为 5° ，综合来看 GOE 433 翼型表现最佳，GOE 434 翼型其次，GOE 435 翼型最差。而对于力矩系数，三者均呈现先平稳后增长趋势，三者数值范围均在 -0.15 ~ -0.08 之间，其中 GOE 435 翼型力矩系数最大，GOE 433 翼型其次，GOE 434 翼型最小。

故结合三种翼型分别在雷诺数为 100000、200000、300000、400000 时下的升阻比、升力系数、阻力系数、力矩系数数据分析对比得出：翼型由于雷诺数的增大与攻角的改变等因素会导致产生翼型表面流体分离现象，而弦厚比较大的翼型在一定程度上会更好的在此情况下保持高效的转化效率。故综合三种翼型整体表现来看，GOE 433 翼型整体表现最佳，所以此翼型相比于其他两个翼型更加适宜高湍流低雷诺数的环境。同时对于大型风力发电机，沿叶片展向不同的部分一般需要不同的翼型，而对于小型风力发电机，整个叶片可以选择同一个翼型，故本设计单独选择 GOE 433 翼型作为本设计翼型模板即可。

第三章 叶片结构设计要求

3.1 叶尖速比和叶片数目

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi r R}{v} = \frac{2 \times 3.14 \times 1000 \times 0.55}{8 \times 60} \approx 7.19 \#(3-1)$$

式中 r 为转速，本文设定风电机额定转速为 1000rpm，属于高转速风机，对于高速风机，其叶尖速比在数值 5~10 的范围内才具有较高的风能利用系数，参考叶尖速比的相关资料，并通过计算确定 $\lambda=7.19$ ^[11]。叶片数目通常设定为两片或者三片，由于三个叶片的风机相比于两个叶片的风机输出功率更加稳定，所以大多数风机设定风机叶片的数量为 3，故本文设定叶片数 $B=3$ 。

由气动数据表查得最大升力系数 $C_l=1.2358$ ，在此最大升力系数下对应的攻角为 $\alpha=10.5^\circ$ ，故 $\alpha=10.5^\circ$ 为本设计翼型的临界攻角。设定本设计叶片叶尖翼型弦长 50mm，根部最大弦长 90mm。

3.2 叶根至叶尖各处弦长计算

(1)各截面周速比:

$$\lambda_i = \frac{2\pi r r_i}{V} \#(3-2)$$

式中 r_i 为距叶根距离， r 为额定转速 1000rpm， V 为额定风速 $V=8\text{m/s}$ ，数据如表 3-1:

表 3-1 各截面周速比

距叶根距离 (m)	周速比
0.55	7.195833
0.5	6.541667
0.45	5.8875
0.4	5.233333
0.35	4.579167
0.3	3.925
0.25	3.270833
0.2	2.616667
0.15	1.9625
0.1	1.308333
0.05	0.654167

(2)计算轴向和切向诱导因子:

Glauert 旋涡理论中假设风轮叶片数是无限的, 不受阻力, 而且翼型的阻力系数为 $C_L=0$, 这时能够使风能利用系数最大。由此推导出的轴向诱导因子 a_i 和切向诱导因子 b_i 可以通过下面的公式进行计算:

$$\theta_i = \frac{\arctan\lambda_i + \pi}{3} \#(3-3)$$

$$a_i = \sqrt{\lambda_i^2 + 1} \cos\theta_i \#(3-4)$$

$$\lambda_i^2 b_i (1 + b_i) = a_i (1 - a_i) \#(3-5)$$

式中 θ_i 为中间变量; a_i 为轴向诱导因子; b_i 为切向诱导因子。计算所得轴向与切向诱导因子的分布如图:

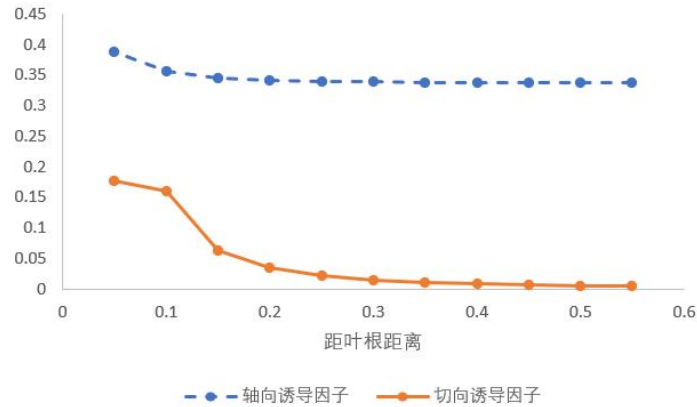


图 3-1 轴向与切向诱导因子分布

(3)计算倾角 φ_i :

$$\varphi_i = \arctan \left[\frac{1 - a_i}{\lambda_i (1 + b_i)} \right] \#(3-6)$$

式中 φ_i 为对应截面的倾角, 数据结果如表 3-2:

表 3-2 各截面倾角

距叶根距离 (m)	倾角
0.55	0.091329
0.5	0.100336
0.45	0.111276
0.4	0.124834
0.35	0.142054
0.3	0.1646
0.25	0.195261
0.2	0.239001
0.15	0.305061
0.1	0.409382
0.05	0.541318

3.3 翼型截面弦长计算

各翼型截面弦长采用下式计算：

$$L_i = \frac{8\pi r_i a_i \sin^2 \varphi_i}{BC_{Li}(1 - a_i)\cos\varphi_i} \quad \#(3-7)$$

式中 C_{Li} 通过查表可得 $C_{Li} = 1.2358$ 。 L_i 随距叶根距离分布如表 3-3：

表 3-3 弦长分布

距叶根距离 (m)	弦长 (m)
0.55	0.015902
0.5	0.017442
0.45	0.019308
0.4	0.021613
0.35	0.024529
0.3	0.028319
0.25	0.033416
0.2	0.040535
0.15	0.050794
0.1	0.064762
0.05	0.066645

(10)截面处翼型扭角：

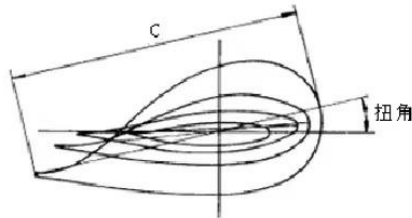


图 3-2 叶片扭角

本设计通过查询气动数据表得出最优攻角为 $\alpha=10.5^\circ$ ，且设计类型为小型风机叶片，设置叶尖翼型处扭角为 0° 并作为扭角零度基准线，得到：

设定叶片间每间隔 0.05m 计算一次翼型扭角，计算公式如下：

$$\alpha_i = \left(79.5^\circ - \arctan \frac{\omega R_1}{V} \right) - \left(79.5^\circ - \arctan \frac{\omega R_2}{V} \right) \quad \#(3-8)$$

将计算结果汇总得到数据如表 2-4:

表 2-4 扭角沿叶片的计算数据

距叶尖距离 (m)	扭转角度
0.45	1.084924566
0.4	2.429766358
0.35	4.138444693
0.3	6.376949835
0.25	9.425445994
0.2	13.78878607
0.15	20.44524974
0.1	31.40063033
0.05	50.44128904

将扭角沿叶片的计算数据进行折线图绘制，得到：

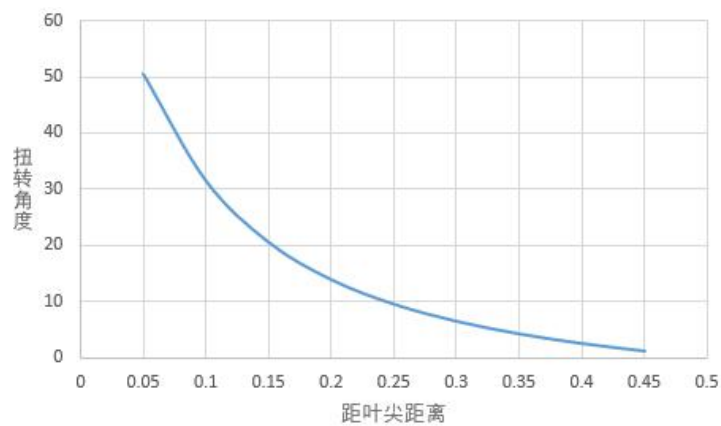


图 3-3 扭角沿叶片展向分布图

第四章 风机叶片 3D 模型设计

4.1 叶片 3D 模型设计要求

本文通过计算得出叶轮直径为 110cm，对其设计情况设定为，叶片翼型长度设计为 45cm，翼型设定为 GOE 433 翼型，其中对于翼型大小设计情况为叶尖翼型最大弦长设定为 5cm，根部最大弦长设定为 9cm。轮毂连接柄长度设计为宽为 3cm，厚度为 1.5cm，长度为 5cm。叶片与轮毂连接柄连接长度设计为 5cm，且为确保叶片美观及高性能，此部分与叶片接连处厚度应与叶片根部厚度保持一致，与轮毂连接柄连接处厚度应与轮毂连接柄保持一致，且二者中间部分应快速收敛。在三维模拟建模结束后会发现所设计的叶片整体会出现多处直角部分，但直角过多极易降低风能转化速率以及具备一定危险隐患，所以需对其进行倒角或倒圆，此过程可以确保叶片整体呈现圆滑状态，进而提高风机转化效率与减小安全隐患。

4.2 叶片的 3D 图形绘制

本设计设定叶片叶尖翼型最大弦长 50mm，根部最大弦长 90mm，通过 Profili 软件导出翼型数据。由于导出翼型数据为二维数据，但 SolidWorks 三维建模软件需要三维数据，故对其添加第三维坐标并设置第三维坐标数值均为 0，将新设置的三维坐标导入至 SolidWorks 三维建模软件中进行三维建模。三维建模情况如图 4-1

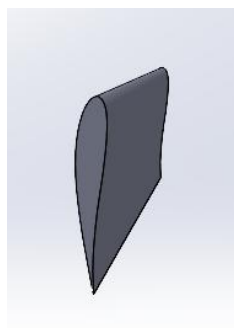


图 4-1 叶片三维建模图

轮毂连接柄参数设置为柄宽为 3cm，厚度为 1.5cm，长度为 5cm，通过 SolidWorks 进行三维建模。三维建模情况如图 4-2

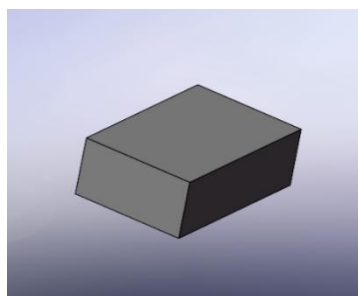


图 4-2 轮毂连接柄三维建模图

4.3 叶片与轮毂连接柄耦合

为确保叶片与轮毂连接柄顺利连接，叶片根部快速收窄至与轮毂的连接柄，收敛长度设定为 5cm。并与连接柄进行链接，三维建模情况如图 4-3

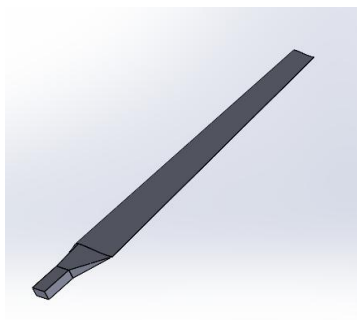


图 4-3 叶片与轮毂连接柄耦合三维建模图

因考虑到安全性，美观性等因素影响，故对叶尖和尾部等特别锋利的边进行倒角或倒圆，结果如图 4-4

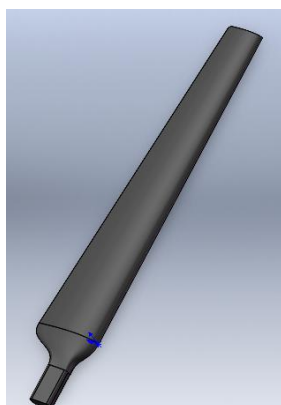


图 4-4 叶片与轮毂连接柄耦合

第五章 总结与展望

5.1 总结

风机叶片作为风力机的核心部件之一，风电机组的风能转化效率和结构强度主要由叶片决定，它设计的好坏将直接关系到风机的性能以及效益。根据特定场址，优化叶片翼型选型可以改善风力机转化效率，并且可以在一定程度上增加风机使用寿命以及美观等特点，所以对于风机叶片相关的研究是非常有意义的。

本文针对小型风电机组通常工作在高湍流强度环境通过对风机叶轮相关数据进行计算，对几种弦厚比较大的翼型进行升力系数、阻力系数、力矩系数、升阻比等相关参数的对比分析，最终选定最优翼型并通过 SolidWorks 三维建模软件对其进行三维建模及细节优化，最终得到升阻比优化的翼型数据及叶片三维建模图。

5.2 展望

本文仅对小风机叶片翼型进行模拟对比，且因为设计的叶片长度并非过长，故未设置翼肋，而普通翼肋的作用是将纵向骨架和蒙皮连成一体，把由蒙皮和桁条传来的空气动力载荷传递给翼梁，并保持翼剖面的形状，然而本文对于小风机叶片添加翼肋是否能够提高风能转化效率并不确定，有待深化实验确定。本文叶片上下蒙皮厚度均采用为 1.5mm，并未进行多种蒙皮厚度对比模拟实验，蒙皮的作用除了形成和维持机翼的气动外形之外，还能够承受局部气动力，故蒙皮厚度的改变对于小型风机叶片气动外形的变化是否有影响并不确定。除此之外，本文未对所设计叶片进行实物打造，同时未对其进行气动性分析，一切数据参数均基于理论计算，故本文研究内容尚不够深入，望有机会可以深入本文研究，完善小风机叶片设计，使研发成果可快速转化并投入至社会中实际使用。小型风力发电机的研究对于空间有限的地方且对风机设备有需求的企业及学校具有重大意义，其对于企业可大大提高经济效益，对于学校则具备教学意义。

参考文献

- [1] 李银然.风力机专用翼型的空气动力特性研究[D].兰州理工大学,2010(04).
- [2] 李宏利.水平轴风力机专用翼型族的设计及其气动性能研究[D].中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2009(11).
- [3] 吴江海.大型风力机叶片及翼型优化设计[D].南京航空航天大学,2012(02).
- [4] 汪泉.风力机叶片气动外形与结构的参数化耦合设计理论研究[D].重庆大学,2013(02).
- [5] 刘强,白鹏,李锋.不同雷诺数下翼型气动特性及层流分离现象演化[J].航空学报,2017,38(4): 27-39.
- [6] 黄宸武,杨科,廖猜猜,等. S809 风力机专用翼型低雷诺数气动特性实验研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(11): 2197-2201.
- [7] 薛丁云,杨科,张磊,等. 风力机专用翼型低雷诺数气动特性实验研究[J]. 太阳能学报,2018,39(4): 1105-1110.
- [8] 曾琴琴.FRP 风力机叶片设计与有限元分析[D].武汉理工大学,2008(05).
- [9] Burton T,Sharpe D,Jenkins N,et al. WindEnergy Handbook[M].John Wiley&Sons Ltd,2001,41-120.
- [10] 包飞.风力机叶片几何设计与空气动力学仿真[D].大连理工大学,2009(04).
- [11] 宋芳芳.小型风力发电机叶片设计及仿真分析[D].浙江大学,2012(07).
- [12] Horton H P.Laminar separation bubbles in two and three dimensional incompressible flow[D].London: University of London, 1968.
- [13] Li Q,Kamada Y,Maeda T, et al. Effect of Turbulent Inflows on Airfoil Performance for a Horizontal AxisWind Turbine at Low Reynolds Numbers (part I: Static Pressuremeasurement)[J]. Energy, 2016, 111: 701-712.
- [14] 李帝辰,魏闯,张铁军,杨威.湍流度对低雷诺数翼型气动特性的影响研究[J].航空科学技术,2022,33(02):12-21.

致 谢

欲买桂花同载酒，终不似，少年游。

行文至此，落笔为终。四载时光，在此结束。我与雅深路 2 号的故事始于 2019 年金秋，终于 2023 年盛夏，四年时光，如白驹过隙，已经接近尾声。但这是结束亦是开始，一种属于我的“人生”刚刚结束，另一种属于我的“人生”才刚刚开始。

一朝沐杏雨，一朝念师恩，感谢我的导师冯老师，冯老师严谨的教学态度，严密的逻辑思维，丰富的学科知识，以及负责任的工作态度让我在学习和生活方面都受益匪浅。

感谢我的家人们对我二十年来学业生涯的支持，无论是在经济上还是精神上都给予我最大的支持，是他们的支持才能让我在这二十年里无忧无虑，希望未来我的家人们能够身体健康，工作顺利，享受美好生活。

最后我想感谢我自己，在这二十年的求学生涯中，没有中途放弃学业，坚持到了现在。也感谢多年以来自己待人待物都是开朗友善的态度，也因此这一路走来收获了很多的知心好友，希望自己可以一直保持这为人处世的态度。也借此机会，我想告诉自己，虽然你没有那么特别优秀，但你也已经很棒了，不要妄自菲薄，未来的你会更加优秀。

愿自己一生坦荡，不忘初心。