

风力机叶片设计与建模

□ 田会方¹ □ 曾琴琴¹ □ 黄超²

1. 武汉理工大学 机电工程学院 武汉 430070

2. 武汉第二船舶设计研究院 武汉 430070

摘要: 根据叶片的特点,通过点的坐标的几何变换理论,采用 MATLAB 软件求解叶片各截面在空间实际位置的三维坐标,并利用 Pro/E 的三维造型功能,以 11 kW 风力机叶片为例,对叶片进行实体建模,为叶片进一步分析奠定基础。

关键词: 风力机叶片 叶素 坐标变换 三维建模

中图分类号: TK83

文献标识码: A

文章编号: 1000-4998(2009)03-0006-03

风力机叶片是风力机的重要部件之一,它直接影响着风力机的性能。不同叶片截面叶素不同,不同位置处截面与投影面夹角各异^[1],用二维绘图得到的主、俯、侧视图难以直观地表达叶片的空间结构。

随着数值模拟技术的发展,风力机的气动模拟计算、振动模拟计算都对风力机的三维造型提出了更高的要求。本文采用 Pro/E 3.0 三维造型软件,介绍一种操作简单、修改方便、通过 txt 文件传递数据一次整体成型的风力机叶片三维实体建模方法。

1 风轮叶片具体尺寸的确定

1.1 11 kW 风力机叶片设计参数

叶片:三叶片扭曲,可变桨距,翼型 NACA4412(如图1所示);风轮直径:11 m;起始风速:3 m/s;额定风速:8 m/s;停机风速:20 m/s;风轮额定转速:83.6 r/min;尖速比: $\lambda=6$ 。

1.2 叶片从转动中心至叶尖不同位置的尖速比

$\lambda = 2\pi Rn / (60v)$ 是叶片尖端线速度与风速的比。叶片从转动中心至叶尖不同半径处的尖速比 λ_i 为:

$$\lambda_i = \lambda (r_i / R) \quad (1)$$

式中: λ_i 为叶片从转动中心至叶尖不同半径处的尖速比; r_i 为叶片从转动中心至叶尖的不同半径, m。

1.3 叶片从转动中心至叶尖不同半径处的剖面翼型

弦长 L_i

为了使设计的叶片在接受空气动力时能平均地分配到整个叶片上,叶片不仅需要扭矩,还需要有不同的翼型弦长,以满足叶片各处有相同的升阻比,取得较高的接受风能的效率^[2]。从转动中心至叶尖不同半径 r_i 处的叶片翼型弦长 L_i 为:

$$L_i = (r_i C_c) / (C_L B) \quad (2)$$

式中: C_c 为叶片形状参数,参考文献[3]可以根据计算出来的对应于 r_i 的尖速比 λ_i 的值求得对应的叶片形

状参数; C_L 为升力系数,由图2取升阻比 C_L / C_D 最佳值,再由最佳值在升力、阻力与迎角 α 的图上查取; B 为风轮的叶片数,此处取 $B=3$ 。

1.4 叶片的实际安装角 θ_i

叶片 r_i 处的叶片实际安装角 θ_i (单位为 $^\circ$) 应为相对迎风角 φ_i 减去叶片的平均迎角,即:

$$\theta_i = \varphi_i - \alpha_m \quad (3)$$

式中: φ_i 为叶片 r_i 处所对应的叶片相对迎风角,由文献[3]查得; α_m 为叶片的平均迎角。

其中叶片的平均迎角为:

$$\alpha_m = \alpha_0 + (C_L / K_L) (1 + 3 / R_Z) \quad (4)$$

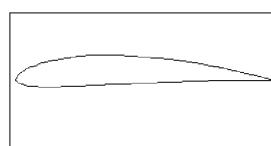
式中: α_0 为升力系数为零时的叶片迎角,通常为负值,此时 $\alpha_0 = -4^\circ$; R_Z 为展弦比,翼展的平方与翼的面积之比,即 $R_Z = R^2 / S_y$; K_L 为升力曲线平均斜率,即 $K_L = (C_{Lmax} - C_{L(0)}) / (\alpha_{Lmax} - \alpha_0)$ 。

通过查表及以上各式的计算,可以确定叶片各个参数,进而几何形状也确定了,同时叶片的实际安装角 θ_i 也可确定。风力机叶片参数可参考表1所示。

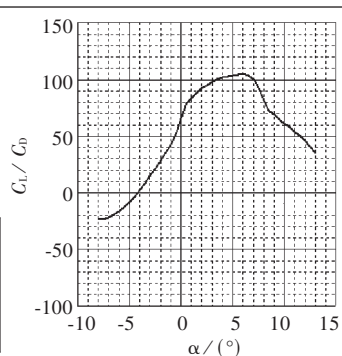
同时风力机叶片二维示意图可参考图3所示。

2 坐标变换

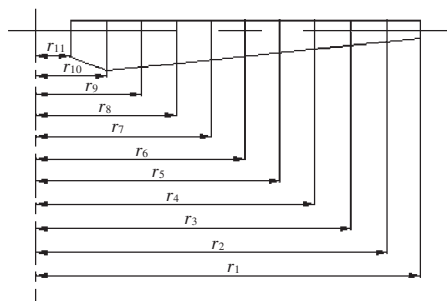
图形变换的实质是对组成图形的各个顶点进行坐标变换,通常情况下采用矩阵变换的形式^[4]。由于



▲图1 NACA4412翼型剖面图



▲图2 $Re = 500\ 000$ 时翼型 NACA-4412的升阻比 C_L / C_D 与迎角 α 的关系曲线



▲图3 风力机叶片二维叶素位置示意图

```
closed
arclength
begin section! 1
begin curve! 1
1 -74.951 2.709 5 500.000
2 -71.607 8.692 5 500.000
3 -68.399 10.952 5 500.000
4 -62.032 14.074 5 500.000
5 -55.693 16.422 5 500.000
```

▲图4 IBL 文件示意图



▲图5 叶片各叶素分布图

利用 Pro/E 中的高级曲面功能即可直接读入记录有数据点信息的 IBL 格式

表1 风力机叶片参数

	r_i/mm	L_i/mm	$\theta_i/(\circ)$
1	5 500	250	-2.07
2	5 000	280	-1.47
3	4 500	310	-0.67
4	4 000	330	0.23
5	3 500	350	1.53
6	3 000	390	3.23
7	2 500	430	5.23
8	2 000	520	8.23
9	1 500	590	12.23
10	1 000	680	19.73
11	500	550	23.73

矩阵变换较复杂,本文采用一种较简单的方法,即基于点的坐标的几何变换理论求解叶片各个截面在空间实际位置的三维坐标。

具体求解步骤如下:

1)通过 PROFILI 软件获得翼型数据 (x_0, y_0) 。

2)求解翼型以气动中心为原点,翼型前后缘连线为 X 轴的二维坐标 (x_i, y_i) ,设气动中心坐标为 (a, b) ,则有:

$$(x_i, y_i) = (x_0, y_0) - (a, b) \quad (5)$$

3)求各叶素翼型的二维坐标。

$$(x_i, y_i) = (x, y) L_i$$

$$L_i = L_i / L_0 = L_i / 100 \quad (6)$$

4)建立三维坐标系。设在叶片旋转中心,平行于叶素的平面为 XOY 平面,叶素上离散点坐标叶展方向为 Z 轴正向。原点设在叶素平面的气动中心。根据以下公式求解各叶素实际空间坐标 (x, y, z) :

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos[\arctan(y_i/x_i) + \theta_i] \\ y &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin[\arctan(y_i/x_i) + \theta_i] \\ z &= r_i \end{aligned} \quad (7)$$

坐标变换通过 MATLAB 软件计算完成,最后输出 txt 文件。

3 三维建模

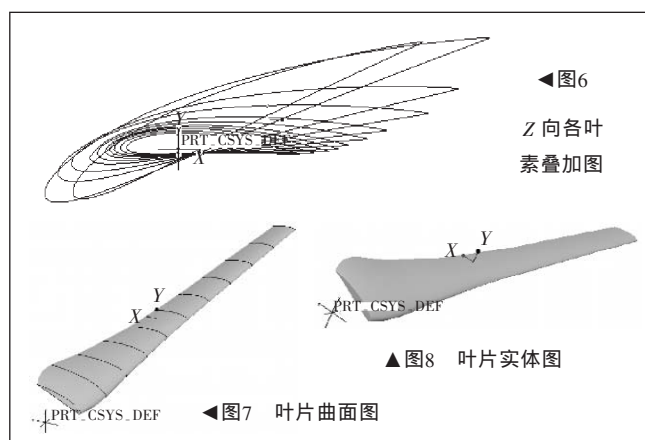
文件,自动混合成曲面模型,封闭模型后,即可转换为实体模型。IBL 文件是 Pro/E 中的一种曲线文件格式,其主要功能就是通过一个截面中的两点定义一条直线,两个以上的点定义一个样条,也可以同时定义不同截面上的曲线,而且可以重新定义由文件创建的基准曲线,也可以通过裁剪或分割其它曲线来生成 IBL 文件。

为了生成闭合曲线,在文件开端应添加供 Pro/E 识别的命令,即:Closed arclength。在每个截面的数据前应标注【begin section! 截面编号】和【begin curve! 曲线编号】。叶片翼型截面对应于 IBL 文件截面,把翼型截面上、下曲线作为一条闭合曲线对应于 IBL 文件截面中的曲线,故每个截面只有一条曲线。在 MATLAB 编程生成的记事本文件中,添加上述命令符后另存为 IBL 文件,即可被 Pro/E 直接读入。本文建模数据形成的 IBL 格式文件如图4所示。

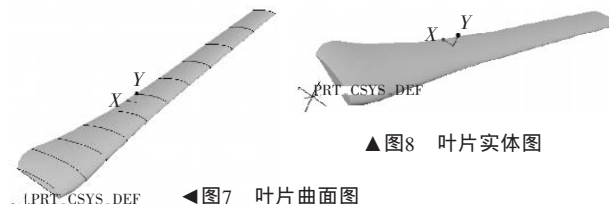
利用从‘插入基准曲线’——‘自文件’——‘选坐标系’的步骤,插入 IBL 文件,可看到各叶素的分布图(如图5)及 Z 向叶素截面叠加图(如图6)。

再利用‘边界混合工具’,依次选取各叶素曲线,得到叶片曲面。如图7所示。

最后,经过对两端曲面的封闭及实体化,就得到叶片的三维实体模型。如图8所示。



▲图6 Z 向各叶素叠加图



▲图7 叶片曲面图

▲图8 叶片实体图

将三维实体模型以 IGS、STP 格式保存,可以与

冗余移动机械手避障能力评估及避障轨迹规划^{*}

□ 王向灿 □ 崔 泽 □ 曹 鹏

上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200072

摘 要: 在由移动平台和冗余机械手组成的移动机械手实体基础上建立了它的运动学模型, 在可操作度学说基础上运用避障矩阵和避障可操作椭圆来衡量机械手中间关节在执行末端轨迹任务时的形状变化能力和避障能力。为了评估机械手整体构型的避障能力, 采用避障操作构型指数, 该指数为移动机械手避障轨迹规划提供了一种途径。

关键词 移动机械手 避障矩阵 避障操作构型指数

中图分类号 TP24

文献标识码 A

文章编号 1000-4998(2009)03-0008-04

冗余移动机械手由轮式移动平台和固定在平台上的冗余机械手构成。通过平台的移动可以扩大机械手的工作空间, 使机械手以更合适的姿态执行任务。冗余机械手是指它本身拥有比它的末端到达所要求的位置和方向所需要的自由度更多的自由度。冗余自由度的机械手在运动控制中能够优化各种性能指标。

最近几年, 冗余移动机械手被用于各种复杂任务, 如焊接、密封等。这类任务需要机械臂末端按照预定的轨迹操作, 同时要避免中间关节与周围物体和操作目标碰撞, 所以有必要应用一种方法来评估整个机械臂的避障能力。Yoshikawa^[1]提出的可操作度椭圆可以衡量机械手的灵活性, 可以用来优化机械手初始构型。本文在可操作度椭圆的基础上用避障矩阵^[2]和避障可操作度椭圆的概念, 来评估机械手中间关节在执行末端轨迹任务时的形状变化能力, 各个关节的避障椭圆大小能反映关节的避障能力。避障椭圆只能反映对应关节的避障能力, 为了评估机械臂整体构型的避障能力,

^{*} 机器人技术与系统国家重点研究室(哈尔滨工业大学)开放基金资助项目(编号 SKLRS200715)
收稿日期 2008年10月

本文根据避障操作构型指数^[3]来完成轨迹规划。

本文首先结合研制的移动机械手实体提出了它的运动学模型^[4], 其次, 提出了可操作度和可操作度椭圆的概念, 并分析了可操作度对移动机械手的初始构型优化。最后在可操作度基础上解释了避障矩阵和避障操作构型指数, 并通过实验分析验证了该指数对机械手构型优化的有效意义, 根据该指数完成了移动机械手的轨迹规划。

1 移动机械手运动学模型

移动机械手由轮式移动平台和固定在平台上的4自由度机械手组成, 移动平台由左右两轮差动驱动, 前轮使用万向轮, 机械手第一个关节为翻转关节, 另外3个关节组成一个平面3自由度冗余机械臂, 在本文研究中将不考虑第一个翻转关节, 移动机械手简化为轮式移动平台和固定在平台上的平面3自由度机械手。

把0关节(移动平台)到 n 关节各个关节在世界坐标系中的坐标, 包括位置和方向, 定义为 $r_i \in \mathbf{R}^m (i = 1, 2, \dots, n)$ 。其中: n 为关节空间维数; m 为工作空间维数; 对冗余机械手, $m < n$, 关节角度向量定义为 $q =$

ANSYS 软件进行数据交换, 为后续的有限元分析做准备。

4 结论

通过 MATLAB 与 Pro/E 的结合使用, 依靠 txt 文件来传递数据使整个建模过程一目了然。通过 MATLAB 编程, 整个过程只输入数据一次, 就能得到所有叶素的空间坐标值, 便于应用于其它翼型。利用 Pro/E 的高级曲面技术一次成型, 避免了每个截面要新建一个坐标及不断重复导入点构建线再生成面的繁琐工作, 给设计带来很大方便。同时所构建的模型与 ANSYS 有兼容的接口, 便于展开风力机叶片的气动、振动

分析, 为后续工作打下基础。

参考文献

- [1] 陈家权, 杨新彦. 风力机叶片立体图的设计[J]. 机电工程, 2006, 23(4): 37-40.
- [2] 杜朝辉. 水平轴风力机的几个关键气动问题探讨[J]. 上海汽轮机, 2002, 3(1): 30-35.
- [3] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 韩晓亮, 汪建文. 水平轴风力机叶片设计与三维造型[C]. 全国第18届计算机技术与应用(CACIS)学术会议, 中国, 宁波, 2007.

(编辑 林 凡)

