

垂直轴风力机技术讲座(四) 升力型垂直轴风力机相关理论

李 岩

(东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

中图分类号: TK83 文献标志码: B 文章编号: 1671-5292(2009)04-0121-03

1 概述

以达里厄风力机和直线翼垂直轴风力机为代表的升力型垂直轴风力机,虽然形状相对简单,但其气动特性却非常复杂。目前,用于升力型垂直轴风力机气动计算和设计的常用方法及其相关理论模型主要有模型法和数值计算法两大类(图 1)。模型法是研究较多、应用较广的方法,它利用空气动力学和流体力学的理论,借助水平轴风力机的分析方法,建立动量模型、涡流模型和叶栅模型。数值计算法是近几年出现的,已成为升力型垂直轴风力机计算和设计一种主要方法。

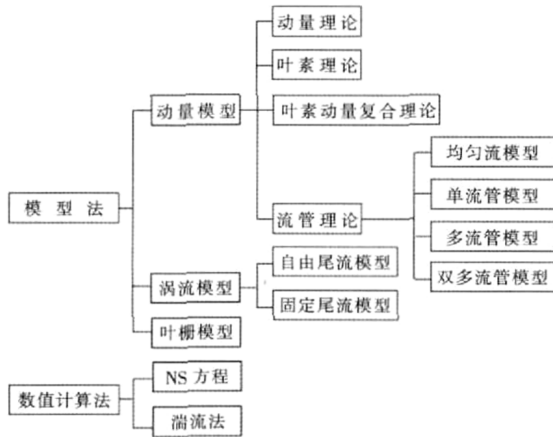


图 1 升力型垂直轴风力机计算设计的主要方法及模型

2 模型法

2.1 动量模型

与分析水平轴风力机叶片气动特性一样,分析升力型垂直轴风力机叶片气动特性的理论,主要有动量理论、叶素理论和叶素动量复合理论。然而,水平轴风力机叶片的旋转面与风向垂直,即来流只穿过风轮一次,而对于垂直轴风力机来说,风轮旋转面与来流平行,风要流入风轮旋转体内部。因此,除了要考虑叶片处的气动特性外,还要考

虑风速在风轮内部的变化情况,这就是升力型垂直轴风力机气动特性较为复杂的主要原因。

研究风穿过垂直轴风力机时的流场的主要理论就是流管理论,其中又包括多种模型,最简单的就是均匀流模型(图 2)。该模型认为,来流穿过风力机时的风速是保持不变的。显然,利用这种理论计算风力机性能的精度不高,因为风作用在风力机上使风力机从风中获得了能量,作为反作用力,风力机对来流起到一种阻挡作用,所以在风力机风轮内部,风速是降低的。

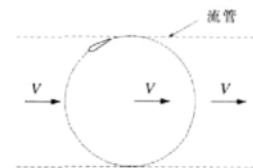


图 2 均匀流模型

将风力机考虑进来,推导出风流经风力机时的流动情况的理论是单流管模型。如图 3 所示,该模型假定风力机整体被包含在一个单一流管之中,通过计算风力机在流管内的能量收支来求得风力机的气动特性。1974 年该理论由 Templin 首先提出,并应用到达里厄风力机的气动特性计算上来。同时这也是首次将风力机制动盘理论应用到达里厄风力机上。但与水平轴风力机的 Gluert 制动盘理论不同的是,流管理论中的制动盘是指风轮转动所形成的假想旋转体的表面,并假定在其内部流速是一定的。该理论考虑到了翼型失速、叶片几何形状、风轮实度以及高径比等影响。

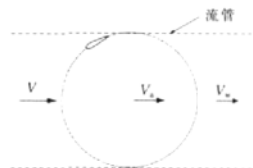


图 3 单流管模型

收稿日期: 2009-07-10。

作者简介: 李 岩(1972-),男,博士,副教授,国家自然科学基金项目主持人,主要从事风能研究和各种可再生能源的综合利用与开发。

E-mail: ly_neau@yahoo.com.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下面以单流管模型为例,简要介绍一种升力型垂直轴风力机气动特性的计算方法。

如图 3 所示,速度为 V 的来流到达风力机处,速度降为 V_a ,穿过风力机,即在风力机尾流处速度又降为 V_w 。设风速减速率为 a ,根据动量理论、伯努力方程和连续方程,可以得到下式:

$$V_a = V(1-a) \quad (1)$$

$$V_w = V(1-2a) \quad (2)$$

设作用于风力机上的阻力为 F

$$F = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_F \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度; A 为风力机风轮受风面积; C_F 为风力机阻力系数。

实际上,当风力机叶片旋转时,平均阻力系数是不断变化的。根据空气动力学理论,可以得到下面的表达式:

$$F = 2\rho A V^2 a(1-a) \quad (4)$$

利用上面各式可以将减速率 a 用含有关阻力系数的式子来表示:

$$a = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_F}) \quad (5)$$

为了得到 C_F , 考虑图 4 所示的叶片处的速度分布,求出来流相对于叶片的相对流入速度 V_r 。

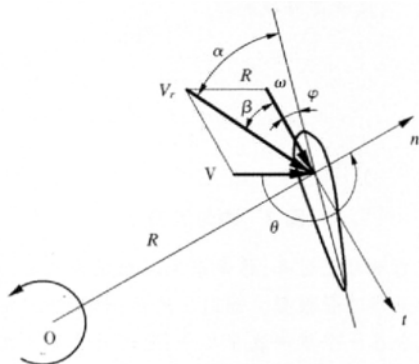


图 4 叶片处气流速度图

图中: R 为风力机半径 (固定叶片的支架半径); ω 为风力机旋转角速度; α 为叶片攻角 (相对风速与叶片弦长间夹角); β 为叶片流入角 (相对风速与切线速度间夹角); φ 为叶片安装角 (叶片弦长与切线方向夹角); θ 为来流与支架的角度。

另外,定义 3 个无量纲参数:相对风速与来流风速之比 k ;叶片尖速比 λ ;叶片尖速比与修正减速率之比 μ 。

$$k = V_r / V \quad (6)$$

$$\lambda = R\omega / V \quad (7)$$

$$\mu = \lambda / (1-a) \quad (8)$$

利用以上各式可得到下面的表达式:

$$V_r^2 = V^2 (1 - 2\mu \sin \theta + \mu^2) \quad (9)$$

$$k = (1-a) \sqrt{1 - 2\mu \sin \theta + \mu^2} \quad (10)$$

根据叶片空气动力学原理,相对风速作用在叶片上产

生的气动力 (升力和阻力) 可以分解为沿着固定叶片的支架轴线方向 (叶片旋转圆周法线方向) 的 C_{F_n} 和与之垂直的沿着旋转面方向 (叶片旋转圆周切线方向) 的 C_{F_t} 。对叶片旋转一周进行积分可以求出阻力系数及其切线和法线成分的表达式。

$$C_F = -\frac{nc}{4\pi} \int_0^{2\pi} k^2 (C_{F_n} \cos \theta + C_{F_t} \sin \theta) d\theta \quad (11)$$

$$C_{F_n} = C_{L_n} \cos \beta + C_{D_n} \sin \beta \quad (12)$$

$$C_{F_t} = -C_{L_t} \sin \beta + C_{D_t} \cos \beta \quad (13)$$

式中: n 为叶片个数; c 为叶片弦长; C_{L_n} 为升力系数; C_{D_n} 为阻力系数。

由此可以求出来流风速的减速率 a 。利用减速率、相对流入风速和叶片气动系数 (升力系数 C_{L_n} 、阻力系数 C_{D_n} 和扭矩系数 C_{M_n}) 可以求出作用在叶片的力矩系数 C_{T_n} 。

$$C_{T_n} = -\frac{nc}{4\pi} \int_0^{2\pi} k^2 (C_{L_n} \sin \theta + C_{D_n} \cos \theta - C_{M_n} c) d\theta \quad (14)$$

力矩系数 C_T 是以作用于叶片上的力矩 T 来定义的:

$$T = \frac{1}{2} \rho A R V^2 C_T \quad (15)$$

另外,需要指出的是,用于固定和支撑叶片的支架也会产生一定的力矩,因此风力机的输出力矩应该是叶片与支架产生的合力矩。由于支架形状、面积和数量的不同,其产生的力矩也不同,所产生的主要是阻力,可参照本讲座第二讲的阻力型垂直轴风力机的力矩计算方法计算。

单流管模型的出现,对升力型垂直轴风力机的性能分析和计算具有非常重大的意义,为后续各种流管模型的提出奠定了基础。由于单流管模型过于简化,计算结果往往高于实验结果。1974 年, Wilson 和 Lissaman 对单流管模型进行了改进,提出了多流管模型 (图 5)。

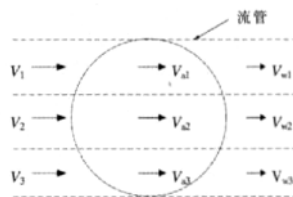


图 5 多流管模型

在该模型中,风轮旋转形成的回转体被分割成一系列相互连接、气动特性相互独立的连续平行流管。再应用叶素动量理论来分析叶片在每一个流管中的气动特性。当时,该模型在计算感应速度时假定了风是无粘性和不可压缩的,因此速度计算只涉及到了升力。1975 年, Strickland 提出了另一种多流管模型,分析了感应速度与叶素力 (包括升力和阻力的影响) 和沿各流管的动量变化之间的关系,同时也考虑了风剪切效应的影响。该模型对轻载荷的计算较为准确,对单流管模型是一次很大的提高。之后,又有多人对多流管理论进行了改进和发展,直至 1981 年, Paraschivoiu 提出了一种新型的流管理论——双多流管模

型(图6)。该模型在多流管理论的基础上,又将风轮旋转形成的回转体沿着来流方向分为两个半圆,各半圆中的流管分别称为上流管和下流管。在每一层中,上下流管中的感应速度按照双制动盘动量理论计算。相比前两种模型,双多流管模型的计算结果更接近于实验,同时对于动态失速的模拟也有很大的改善。但该模型对于具有较大实度的风力机以及在高尖速比情况下的精度有待于提高。

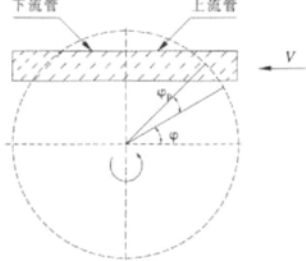


图6 双多流管模型

2.2 涡流模型

除动量模型外,涡流模型也是垂直轴风力机气动特性计算的主要方法。该模型的主要原理是利用叶片尾流的涡度来计算速度场的变化,再用速度场计算压力场的变化。涡流模型主要包括自由尾流模型和固定尾流模型。固定尾流模型是将涡流模型与采用单流管模型的动量模型组合的方法。自由尾流模型可进行三维计算,考虑了动态失速,是目前较精确的计算方法。下面简要介绍自由尾流模型。

根据涡流理论可将风力机单枚叶片看作是沿着翼展方向的一系列要素的集合,叶素可以用束缚涡丝或者升力线来代替(图7)。根据亥姆霍兹涡量方程,束缚涡旋的强度等于翼端的涡旋强度;又根据凯尔文定理,沿翼展方向放出的涡旋等于束缚涡旋的强度变化。这些涡旋在流场中自由移动扩散,被称为自由涡旋。由这些强度可知的涡旋场可以确定出感应速度场(图8)。

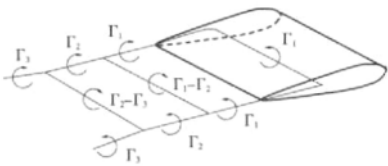


图7 单叶素的涡丝系统示意图

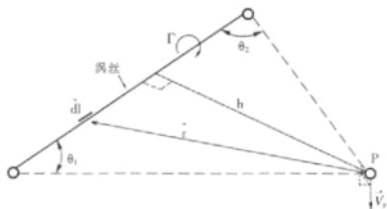


图8 单叶素的涡丝系统示意图

根据皮涅—萨瓦公式,对于长度为 l ,强度为 Γ 的涡丝,流场中某一点P处的感应速度 V_p 的计算式如下:

$$\vec{V}_p = \vec{e} \frac{\Gamma}{4\pi h} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (16)$$

式中: \vec{e} 是 $(\vec{r} \times \vec{l})$ 方向的单位向量。

利用库塔—儒可夫斯基定理可得到束缚涡旋强度与作用叶素翼展方向单位长度上的升力的关系:

$$\Gamma = \frac{1}{2} V_r c C_L \quad (17)$$

2.3 叶栅模型

叶栅模型主要是借助涡轮机械中的叶栅理论来计算,由于使用者相对较少,在此不作介绍。

3 数值计算法

随着计算机技术的进步,计算流体力学(CFD)的发展很快,计算速度和精度大大地提高,计算成本大幅度降低,数值计算法已经成为风力机性能计算和设计的主要手段之一。数值计算法主要分2大类:一是通过求解内维—斯托克斯方程(NS方程)的计算方法;另一类是利用湍流理论的计算方法。当然二者不是绝对完全独立的,彼此也有交叉和融合。目前这2种方法都在不断地发展之中。

数值计算方法的一般步骤:首先在叶片周围进行网格构建;其次要设定出边界条件和初始条件;最后选择计算模型进行计算。图9是三角形网格的例子。图10是利用数值计算得到的三叶片直线翼垂直轴风力机静态流场的流迹线图。

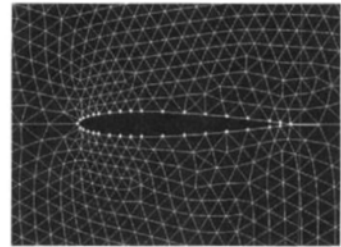


图9 数值计算网格举例

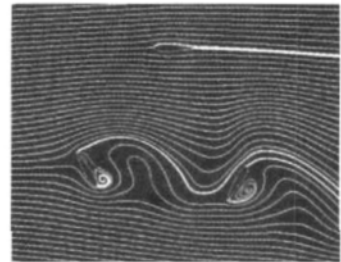


图10 直线翼垂直轴风力机流场计算举例

通过流场分布可以继续计算出涡流场和压力场分布、叶片的升阻力系数和力矩系数等,从而获得风力机的性能。数值计算方法要求具备相对较高的数学和流体力学知识,对计算机硬件的要求也很高。 (连载待续)