

垂直轴风力机技术讲座(五) 垂直轴风力机设计与实验

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)05-0120-03

1 垂直轴风力机设计

风力发电机组的设计要综合考虑用户的要求、安装地点的风况条件和现有技术水平等因素,力争达到最佳性价比。风力发电机组设计包括总体设计和分项设计。在总体设计阶段要进行全面地分析,确定风力发电机组的初步技术方案,主要包括:整机的气动布局设计、动力学设计、总体布局设计、总体结构设计、可靠性与安全设计、各零部件与系统的方案选择等。垂直轴风力机与水平轴风力机的总体设计原则与方法是基本一致的,在此不做过多介绍。分项设计主要是对风力发电机组的各组成部分和零部件等进行设计。阻力型垂直轴风力机的组成相对简单,因此本讲主要介绍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主要组成部分的设计。垂直轴风力机主要设计参数如下:风轮与叶片、中央支柱与水平支架、拉索、发电机与制动器、传动系统、控制与安全系统。

风力机设计必须依据标准进行。水平轴风力机相关标准比较完备,国际上主要有 IEC 标准和德国 GL 认证标准,要想使产品打入国际市场,必须要通过严格的认证检验。我国也制定了一系列风力机的相关标准,包括等同采用 IEC 标准和自行制定的各级标准。但目前专门针对垂直轴风力机的标准较少。

1.1 风轮设计

垂直轴风力机与水平轴风力机的最大区别是风轮形式的不同。风轮设计参数主要包括风轮扫掠面积、实度和高径比等。

1.1.1 扫掠面积

风力机的输出功率 P 与风力机效率 C_p 、风轮扫掠面积 A 和风速 U 的三次方成正比。因此在一定风速下,要获得更大的功率,需要增加风力机的风轮扫掠面积。

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (1)$$

由于达里厄风力机叶片为曲线型,且曲线形式多样,所以叶片旋转所形成的精确风轮扫掠面积需用积分求得。长期以来,对于不同容量级别的达里厄风力机最佳扫掠面积的研究从未停止过,但研究结果却不尽相同。20 世纪 70 年代,一些机构和公司对扫掠面积 20~600 m² 的达里厄风力机进行了研究,并以此为基础,在 80 年代初推出了一些样机。80 年代中期,商用达里厄主流风力机的扫掠面积在 300 m² 左右。80 年代末期,DAF Indal 推出了容量 1 500 kW、扫掠面积达 1 700 m² 的风轮,Eole 推出了目前世界最大的达里厄风力机,风轮扫掠面积达 4 000 m²。随着风轮扫掠面积的增大,风轮质量增加,使整机成本提高。研究表明,达里厄风力机风轮质量和成本与风轮直径的三次方成正比。但由于材料和加工技术的不同,该比例也有一定变化。综合考虑土地、管理、基础设施建设等其他要素,大型机的性价比仍然较高。

表 1 给出了一些现有达里厄风力机的风轮参数,以供设计时参考。

表 1 一些达里厄风力机的风轮参数

| 风力机 | 扫掠面积 m ² | 风轮质量 kg | 单位面积质量 kg/m ² | 用途 |
|---------------|------------------------|------------|-----------------------------|----|
| FloWind 17 m | 241 | 7 524 | 26.1 | 商用 |
| FloWind 19 m | 315 | 10 962 | 34.8 | 商用 |
| Magdalen 24 m | 478 | 14 961 | 31.3 | 研究 |
| Indal 6400 | 495 | 17 770 | 35.9 | 商用 |
| Sandia 34 m | 955 | 72 198 | 75.6 | 商用 |
| Eole | 4 000 | 300 000 | 75 | 样机 |

1.1.2 高径比

风轮高度与直径的比值为风轮的高径比。为了使叶片长度与中央支柱的高度在给定的扫掠面积下最小,以前的设计大多采用小的高径比。然而,小高径比的低速力矩较高,整个驱动部分的成本大幅提高,同时叶片重力产生的

收稿日期: 2009-09-14。

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

应力也会增加,需要通过调整叶片翼型的气动特性来减少其影响。因此,后来的设计趋于采用较大的高径比。另外,增加风轮的高径比使风轮的高度增加,从而获得更多和更稳定的风能。但是,大高径比对风轮强度、材料与支撑固定系统的要求也增加,因此在设计时需要均衡考虑。对于直线翼垂直轴风力机,其高径比一般选择为 0.5~3.0。

1.1.3 实度

实度是影响垂直轴风力机性能的最主要设计参数之一,它是指所有叶片在风轮旋转平面上的投影面积之和与风轮扫掠面积的比。如式(2)所示,实度用叶片弦长与风轮旋转面周长来表示。式(3)是其简化式。

$$\sigma = \frac{nc}{2\pi R} \quad (2)$$

$$\sigma' = \frac{nc}{R} \quad (3)$$

式中 n 为叶片个数, c 为叶片弦长, R 为风力机半径。

实度设计要与叶片个数、叶片弦长和风轮尖速比等其他设计参数组合考虑。设计要求不同,实度选取原则也不同。如果为了降低成本,可尽量选择较小的实度。

图 1 为垂直轴风力机实度与功率系数和尖速比关系的示意图。风力机实度较小或较大都会使功率系数降低。小实度风力机可以达到较高的尖速比,大实度风力机所能达到的最大尖速比相对较低,其原因是实度增大使风力机对风的阻力增大,吹到叶片上的风速减弱,导致叶片产生的高旋转力矩攻角向低尖速比方向移动。另外,大实度风力机的起动特性要好于较小实度的风力机。

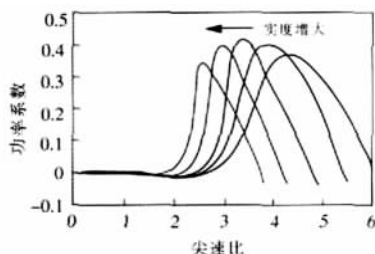


图 1 实度与风力机功率关系举例

1.2 叶片设计

1.2.1 叶片翼型

垂直轴风力机叶片工作在很宽的攻角范围,低尖速比情况下为 $\pm 180^\circ$,高尖速比情况下为 $\pm 10^\circ$ 。在不同叶片相位角处,来流风速、旋转角速度和风轮内部风速变化会导致叶片上动压的周期变化,这种复杂的气动特性要求对垂直轴风力机叶片进行精确地设计。总体来说,垂直轴风力机的叶片翼型至少要具备以下特性:升力系数大,且阻力系数小,即具有高的升阻比;阻力系数对称于零升力角;具有较大的负纵向摇动力矩系数。

较流行的叶片翼型是采用美国 NACA 的 4 位数系列对称翼型,比较常用的有 NACA0012、0015 和 0018。达里厄风力机在初期多采用 NACA0012 和 0015 这两种薄翼

型,后来由于对强度要求的提高而逐渐采用 0018 翼型。目前,达里厄风力机的叶片翼型多采用各种翼型组合的方式。开发风力机专用翼型需要很强的科研基础和大量投入。美国的 NREL、丹麦的 RISø、荷兰代尔夫特工业大学以及日本东海大学在翼型技术开发方面领先。

1.2.2 叶片个数

达里厄风力机的叶片个数一般为 2 或 3 枚。从力矩特性与构造力学的角度考虑,3 叶片较为合理,从机械加工、材料与加工建设成本考虑,2 叶片更为有利。另外,在给定的风轮实度下,2 叶片的翼型弦长较大,在结构力学方面有利。随着叶片成型加工技术的提高,制作大弦长的大叶片技术也已趋于成熟。

直线翼垂直轴风机的叶片个数一般为 2~6 枚。目前较多采用 3 叶片或 4 叶片。叶片个数的选择主要根据所选风轮实度而定。另外要考虑风力机安装点的风况条件及风力机特性的侧重点等。

1.2.3 叶片材料与结构

初期的达里厄风力机叶片采用拉压成型钢板材料或铝合金与玻璃纤维挤压成型;后来也出现过木质叶片,近年来一般采用多孔铝合金整体成型加工技术。图 2 所示为早期达里厄风力机叶片加工的情形。直线翼垂直轴风力机叶片材料及结构与水平轴风力机类似,一般选用铝合金材料或玻璃纤维和碳纤维等增强塑料材料。目前,较流行的是采用玻璃纤维增强塑料(GFRP)、木质材料和重量轻、强度高的高分子纤维材料(FRP)也被广泛采用。

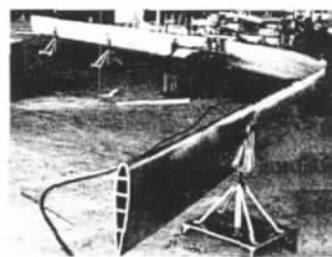


图 2 早期达里厄风力机叶片加工

叶片结构主要包括蒙皮和内部结构 2 部分。内部结构主要有 3 种形式:在内部填充发泡体以增加抗弯强度,这种形式较多应用在小型机上;内部采用桁架结构增加抗弯强度,不填充加固材料;蒙皮采用强度好的 FRP 材料承担弯曲强度,内部夹心加固结构可以承担剪切应力和一定的弯曲应力,既达到抗弯效果,又保证了轻量化,目前,大多数风力机均采用这种形式。

1.3 中央支柱与水平支架设计

中央支柱一般采用密封圆管或桁架结构。早期多采用三面体桁架结构。自从 1975 年圣地亚 17 m 机型采用圆柱形式后,开始流行圆管结构。支柱材料多为钢管或者经过内部加强的铝合金。中央圆柱的理想形状为上下两端采用小直径,风轮中央处为最大直径,其间采用梯状渐变的形式。

水平支架的作用是保证叶片的稳定,减少作用于叶片上的平均应力与疲劳应力,同时将一部分力矩传递给中央支柱。水平支架还减少风轮的固有振动,却增加了重量与成本,也使风轮阻力与能量损失加大。美国的达里厄风力机一般不带有水平支架,而加拿大的达里厄风力机通常都有水平支架。但是,如果叶片弦长很小的话,建议设置水平支架。水平支架的安装位置与中央支柱上下两端的距离至少为风轮高度的10%,一般选择15%。

1.4 拉索设计

采用拉索结构是固定和支撑高耸结构的最有效方法之一。达里厄风力机和直线翼垂直轴风力机一般都要用一组(3根或4根)拉索来加固。拉索重量相对较轻、价格也较为合理。缺点是要占用一定的面积,且不太适合于倾斜地点的安装。安装拉索时,必须在拉索下设置基础,必须通过计算预设一定的张力,拉索与叶片间必须留有足够的空间;为保证拉索具有最大强度,拉索与水平面夹角应为 35° ,要考虑拉索的横向振动。

2 垂直轴风力机实验

一般来说,所有风力机在设计开发阶段和加工完成后都要进行实验验证。按照实验类型,风力机实验可分为原型实验与模型实验,按照实验方法,分为风洞实验和现场实验。另外,还有运用流动显示技术的可视化实验。对于小型风力机可进行原型实验,而对于大中型风力机则要依据相似原理进行模型实验。

2.1 风洞实验

风洞实验是风力机开发设计与性能测试的最主要的实验形式。风洞是指采用适当的动力装置在专门设计的管道中造成空气流动,用来进行各种类型的空气动力学实验的设备。风力机实验一般采用低速风洞。风洞一般有直流开口式、回流开口式或回流闭口式等。回流式风洞的气流比直流式风洞的气流均匀稳定,但风洞造价较高;闭口式风洞比开口式风洞的能量损失小,但由于风力机安装在闭口实验段内,边界的阻塞效应突出,须要控制风力机风轮扫掠面积与风洞实验段截面积的比例,否则要对实验结果进行修正,而开口式不存在这个问题。开口式风洞的实验段截面有矩形和圆形2种(图3),达里厄风力机实验宜选择圆形风洞,直线翼垂直轴风力机实验宜选择矩形风洞。

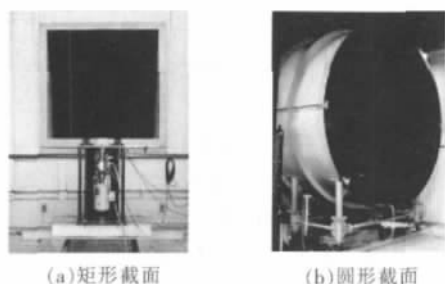


图3 风洞出口形式

下面以一种直线翼垂直轴风力机性能测试系统来简要介绍一下风洞实验测试系统的一般构成(图4)。

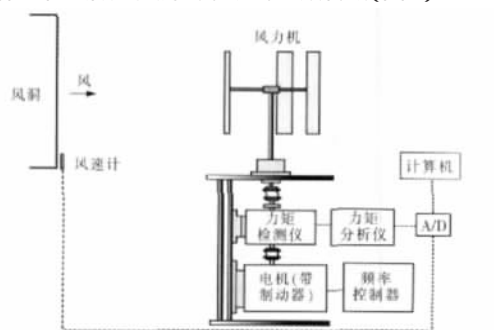


图4 风洞实验测试系统举例

风力机风轮中心应与风洞吹出口中心一致,并应固定在下流风速分布稳定之处。风速可用皮托管或热线风速计测量。风力机转轴通过联轴器与力矩仪连接,并通过力矩分析仪采集数据至计算机。多数力矩仪均附带转数传感器,可测风力机转数。另外,还可根据需要添加角度传感器,以获取风力机输出力矩与风力机旋转角的关系。根据实验目的或测试内容的不同,风力机可由电机带动,由变频器控制转数,或由制动器直接控制转数。

2.2 可视化实验

在风洞中安装流动显示设备,便可以进行可视化实验,获得风力机周围流场的直观显示。常用的可视化方法包括:壁面显示法、丝线法、示踪法和光学法等。示踪法中的烟线法是风力机可视化实验的常用方法。在风洞的吹出口安装烟线发生器,由稳定电源调控发生器产生不同流速的稳流烟线。在暗室状态下,通过设置在风力机上方的高速照相机可以拍摄到烟线绕过风力机时的状态,烟线即可代表来流的流迹线。

近年来,得益于计算机图像处理技术的快速发展,出现了诸如粒子图像测速法(PIV)和粒子跟踪测速法(PTV)等先进的可视化方法。PIV是目前最先进的可视化手段,在流场中注入示踪粒子,在相隔很短的时间间隔内,测量示踪粒子的位移,通过计算机画像识别技术,计算出粒子的速度矢量。它可以获得直观、瞬时、全场的流动信息,无接触测量流场中的速度分布,具有很高的精度。

2.3 现场实验

在风力机的设计计算和模型实验后,应制作样机,在野外进行现场实验。在风力机安装地点应设置测风装置。野外实验通常要进行1~2a。测试数据包括:年风况条件、年发电量、年有效工作时间及设备利用率等。野外实验用风力机比实验室研究用风力机的要求高得多,要充分考虑所能遇到雷电、强风、结冰等极端气候条件的影响。

(连载待续)

