

# 垂直轴风力机技术讲座(一)

## 垂直轴风力机及其发展概况

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)01-0121-03

### 1 风力机及其分类

风力机是将风的动能转换为机械能,再把机械能转换为电能或热能等的能量转换装置。经过多年的研究与发展,出现了多种多样的风力机。

风力机分类方法有多种,一般根据风力机的用途、容量、叶片个数、叶片尖端速度与来流速度之比、风轮与塔架的相对位置等对风力机进行分类。风力机的型式主要有 2 种:按照风力机风轮转轴与风向的位置,分为水平轴风力机和垂直轴风力机;按照风力机叶片的工作原理,分为升力型风力机和阻力型风力机。图 1 给出了风力机的主要分类及其代表机型。

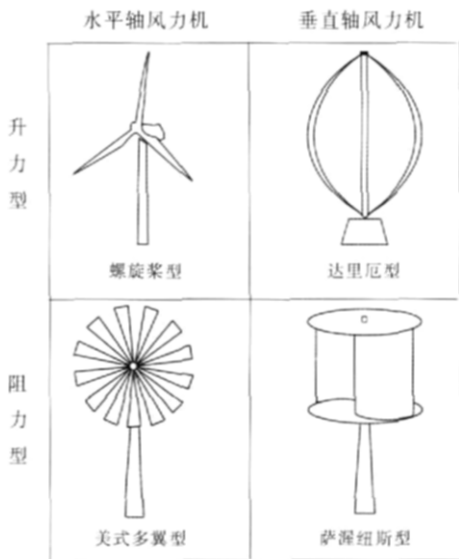


图 1 风力机的主要分类及其代表机型

#### 1.1 水平轴风力机与垂直轴风力机

风力机风轮转轴与风向平行的风力机为水平轴风力机,主要有螺旋桨型、美式多翼型、荷兰型和风帆翼型等。

风力机风轮转轴与风向成直角(大多数与地面垂直)

的风力机为垂直轴风力机,主要有达里厄型、萨涅纽斯型和涡轮型等。根据其叶片形状的不同,达里厄型风力机又分为曲线翼型和直线翼型 2 种。通常所说的达里厄风力机都是指具有曲线翼型叶片的,而直线翼型达里厄风力机通常称为直线翼垂直轴风力机。

#### 1.2 升力型风力机与阻力型风力机

作用在风力机叶片上的风力可分解成与风向垂直和与风向平行的 2 个分力,垂直分力称为升力,平行分力称为阻力。

主要依靠升力来工作的风力机称为升力型风力机,水平轴的螺旋桨型风力机、垂直轴的达里厄型和直线翼型风力机都属于这种类型。由于升力的作用,风轮的圆周速度可以达到风速的几倍乃至十几倍。升力型风力机多被用于发电。

主要依靠阻力来工作的风力机称为阻力型风力机,水平轴的美式多翼型风力机、垂直轴的萨涅纽斯型和涡轮型等风力机属于阻力型风力机。该类风力机转速不高,但输出扭矩很大,所以常被用于提水、碾米和拉磨等动力。

### 2 垂直轴风力机的特点

升力型的达里厄风力机和直线翼垂直轴风力机是垂直轴风力机的代表,下面通过与水平轴螺旋桨式风力机进行比较,来说明垂直轴风力机的主要特点。

#### 2.1 风能利用效率

从理论上讲,升力型垂直轴风力机与水平轴螺旋桨式风力机具有大致相同的理想效率,即贝茨极限效率(0.593)。由于水平轴螺旋桨式风力机借助了航空动力技术的科研成果,得到了快速的发展,技术趋于成熟。一般其风能利用系数可达到 0.4~0.5,叶片尖速比可以达到 6~10。然而,垂直轴风力机的研究起步较晚,研究理论和设计方法还处于发展阶段,据现有研究和实验结果看,风能利用系数在 0.4 左右,叶片尖速比可以达到 4 左右。

收稿日期: 2008-12-08。

作者简介: 李 岩(1972-),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

## 2.2 风向影响与启动性

垂直轴风力机可以接受任何方向的来风,不需要水平轴风力机所必须具备的迎风转向(偏航)机构。因此,垂直轴风力机的结构比水平轴风力机简单,成本较低。

阻力型垂直轴风力机中,萨涅纽斯型风力机的自启动性能最好;达里厄风力机的启动需要启动电机来带动,或者与萨涅纽斯风力机组合使用,来解决启动问题,这也是达里厄风力机最大的弱点。通过合理选择叶片翼型和安装角,直线翼垂直轴风力机可以获得较好的自启动性。水平轴螺旋桨式风力机只有在风轮正对来风的情况下可以自启动,侧风时则需要偏航调整后才能启动。

## 2.3 风力机结构

由于沿着叶片翼展各处的圆周速度和相对于风速的迎角不同,水平轴螺旋桨式风力机的叶片需要进行扭转和变截面,因此,水平轴风力机的叶片比垂直轴风力机的叶片相对复杂,加工成本相对较高。达里厄风力机的叶片虽然是弯曲的,但叶片表面对翼弦是对称的,加工相对容易。直线翼垂直轴风力机的叶片是直线型的,没有扭曲也没有变截面,形状简单,加工容易,成本低,但其不足之处是直线叶片旋转时会承受由向心加速度产生的较大的弯矩,因此对叶片材料要求高。

水平轴风力机的发电机与变速制动装置等需要安置在几十米高的塔架上,而达里厄风力机的发电机则可以安装在地面上,这样可以降低对设备的安装尺寸、重量和运行条件等要求,日常维护和修理也非常简便。

## 2.4 环保问题

风力机运行对环境产生的影响主要是产生噪音、伤及鸟类和有碍景观三大问题。水平轴螺旋桨式风力机的叶尖在扫过气流时产生很大的噪音;同时,叶片的高速旋转也有可能伤到来不及躲避的鸟类。相比之下,垂直轴风力机的尖速比较低,使其产生的噪音很小,对鸟类也几乎没有影响。达里厄风力机优美的曲线型叶片以及直线翼垂直轴风力机简洁的造型,可以为景观增加变化的元素,获得更好的视觉效果。

## 3 垂直轴风力机的发展

人类利用风能的历史可以追溯到公元前。公元 1219 年,我国就有了关于垂直轴风力机的文献记载。公元 1300 年,波斯也记载了具有多枚翼板的垂直轴风力机。这些垂直轴风力机都是阻力型风机,多数被用来提水,碾米或助航等。19 世纪末,丹麦首先开始研究利用风力发电,从此世界各国开始研发各种用于发电的风力机。

与水平轴风力机相比,垂直轴风力机的研究相对滞后。20 世纪 20~30 年代是垂直轴风力机研究的第一个高峰期。这期间出现了多种类型的垂直轴风力机,主要有萨涅纽斯型(Savonius rotor)、马达拉斯型(Madaras rotor)和达里厄型(Darrieus VAWT)等。

1929 年,芬兰工程师 S.J.Savonius 发明了后来以其名字命名的萨涅纽斯型风力机(如图 1 中所示)。它具有结构简单,成本低,回转矩大,启动性能好等优点,但转数和效率较低。尽管如此,许多学者对这种风力机的研究却没有间断过。

马达拉斯型风力机是美国的 Julius D. Madaras 提出的一种垂直轴风力发电装置,其原理如图 2 所示。在气流中旋转的圆柱可以使该物体周围的压力发生变化而产生升力,这种现象被称为马格纳斯效应。借助该效应产生的升力可以带动小车沿轨道运动,从而利用车轮的旋转来驱动发电机发电。然而,由于轨道两端需要有改变圆柱旋转方向的机构而使机构过于复杂、旋转圆柱的过慢圆周速度使其空气动力特性十分微弱、大轨道负荷产生较大的摩擦损失、地表风速低和发电损失大等原因,马达拉斯的大规模发电构想最终未能成功。这种风力发电装置至今已无人问津。

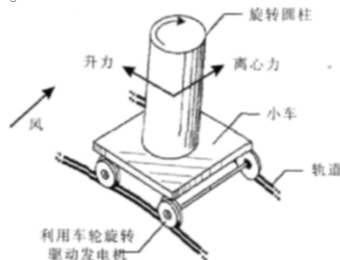


图 2 马达拉斯利用马格纳斯效应发电示意图

1931 年,法国工程师达里厄(George Jeane Mary Darrieus)从美国专利局获得后来以其名字命名的达里厄风力机的专利。当时达里厄风力机的叶片包括了曲线翼型和直线翼型 2 种形式。我们通常所提到的达里厄风力机主要是指具有曲线翼型叶片的风力机(图 1)。如前所述,直线翼型达里厄风力机简称直线翼垂直风力机(图 3)。

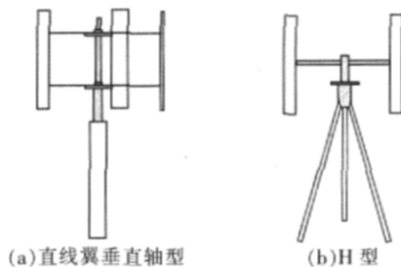


图 3 直线翼型与 H 型垂直风力机

根据直线翼垂直轴风力机的形状结构特点,有人将其称之为 H 型风力机,在我国也多采用这种叫法。在国际上,H 型垂直轴风力机一般是指英国在 20 世纪 70~80 年代研究开发的具有 2 枚直线翼叶片的垂直轴风力机(图 3-b)。但由于 H 型垂直轴风力机与直线翼垂直风力机十分类似,有时将它们统称为 H 型风力机。英国的 VAWT 公司曾经生产过一系列不同容量的 H 型垂直轴风力机。

下面着重介绍一下曲线翼型达里厄风力机的发展。

达里厄风力机叶片形状可形容为由一根柔软的绳子按一定角速度绕两端的固定点垂直旋转时所形成的曲线,这个形状可以保证叶片在离心力的作用下内弯曲应力最小。当时,因为各国都将研究精力集中在水平轴螺旋桨式风力机上,所以达里厄风力机的出现并未引起风能界很大的重视。紧接着,第二次世界大战的爆发使全世界风能技术的发展都处于停滞。战后至 20 世纪 60 年代,廉价石油的大量使用又使包括风能在内的所有可再生能源都没有受到重视。

1973 年爆发的世界石油危机给风能发展提供了机遇。以此为契机,垂直轴风力机,尤其是达里厄风力机在 20 世纪 70~80 年代迎来了第二次发展高峰,这一时期的研究主要集中在北美。加拿大国立研究委员会(NRC)和美国圣地亚国立实验室(SNL)对其进行了大量的理论和实验研究。同时,美国、加拿大的一批风力机制造公司经过不断地研发攻关,使达里厄风力机的研究逐渐深入,并且形成了商品化。1972 年,加拿大 NRC 的 R.S.Rangi 和 P. South 对达里厄风力机进行了最初的风洞实验,对影响达里厄风力机性能的叶片个数、风轮实度等参数进行了测试。1974 年,美国的 SNL 设计制作了 1 台直径 5 m 的研究用达里厄风力机,1977 年又制作了 1 台直径 17 m 的 60 kW 样机。1980 年,美国的美铝公司(Alcoa)生产了 4 台直径 17 m,功率 100 kW 的风力机,其中 2 台并网发电,其中 1 台风力机成功地完成了 10 000 h 的运行记录,并经受住了 53 m/s 强风的考验。

1981~1986 年,美国福禄风力公司和美国 SNL 合作,共同开发达里厄风力机。1984 年,福禄风力公司研制了 2 台具有 2 枚 NACA0015 翼型叶片的 FloWind 19 m 风力机,风速 20 m/s 时,转速 52.8 r/min,功率达到 250 kW。为此福禄风力公司与圣地亚国立实验室共同获得了 1984 年度美国能源部全国能源创新最高奖。之后,福禄公司在美国加州的 Altamont Pass 和 Tehachapi Mountain 建立了 2 座风电场,安装了上百台达里厄风力机,装机总容量达到 170 MW,是世界上最大的达里厄风力机群之一。

1987 年,在美国能源部(DOE)的资助下,SNL 成功地研制了一台商业和研究两用的大型达里厄风力机,直径 34 m,输出功率为 625 kW。风力机的叶片采用变截面设计,即叶片中部采用了 SNL 开发的 VAWT 用 SAND0018/50 翼型,根部采用 NACA0021 翼型。该达里厄风力机既可以用于平时发电,也可以用于新型叶片翼型、风力机性能测试等实验研究之用,是一台非常著名的达里厄风力机。通过美国圣地亚国立实验室和一批风电公司的达里厄风力机现场的实验,获得了大量的、可信度高的实验数据,这些数据被用来与理论分析相对比,为达里厄风力机的深入研究发挥了重要的作用。

1977 年 5 月,加拿大第一台大型达里厄风力机在魁

北克省东部的马格达伦岛建成,其平均功率为 100 kW,然而,由于没有制动装置和不具备自启动性等问题,使该机受到了损坏,1978 年,用另一台与其类似的样机取代了它。正是这台样机的运转数据为加拿大提供了大型达里厄风力机现场实验的第一手资料。在运转中观测该机在转速 29.4 r/min 的动态失速现象,并记录了失速情况下的风力机空气动力特性变化情况。这些数据为 Indal Technologies 公司后来生产的 Indal 6400~500 kW 风力机的设计提供了重要参考,将以前未曾考虑过的动态失速效应对风力机气动性能的影响问题,充实到风力机设计理论中。

1986 年,加拿大的 Lavalin 公司开始生产 Eole 系列达里厄风力机。Eole-64 风力机直径 64 m,是目前最大的达里厄风力机,安装在魁北克的 Cap-Chat。该风力机具有 2 枚采用 NACA0018 翼型的叶片,额定转数固定为 10 r/min 和 11.35 r/min,在风速 17 m/s 时,其最大输出功率可达 3.6 MW,超过此风速时,叶片的速度会降低,从而使功率输出保持一定。

除了上述介绍的美国 and 加拿大之外,英国(VAWT 型)、法国(CENG D 型)、荷兰(Pionier I 型和 Cantilever 型)、罗马尼亚(TEV 100 型)和瑞士(Alpha Real 型)等国家都研制过达里厄风力机。

20 世纪 90 年代,随着水平轴螺旋桨式风力机成为大型商业风力发电场的主流机型,以达里厄风力机为代表的大型垂直轴风力机逐渐淡出了人们的视野。然而,在中小型风力机市场上,垂直轴风力机还占有很大的市场,尤其是 2000 年以来,直线翼垂直轴风力机和 H 型风力机的研究和应用受到了北美、欧洲和日本等国家和地区的关注,许多形状各异的商用中小型垂直轴风力机被成功投入市场。比如,美国的 Mag-Wind 公司和加拿大的 Cleanfield Energy 公司推出了可安装于屋顶的垂直轴风力系统;法国的 Gual industrie 公司,芬兰的 Windside 公司和意大利的 Ropatec AG 等公司推出了改良后的阻力型垂直轴风力机,尤其是芬兰 Windside 公司的 WS 系列风力机可以在极端恶劣的气候环境中工作。在日本,东海大学的関和市教授从 1976 年就开始从事直线翼垂直轴风力机的研究,开发了 TWT 系列风力机叶片专用翼型,在日本各地安装了多台样机进行现场实验,并且在日本大力推广这种风力机。可以说,目前垂直轴风力机的第三次发展契机正在出现。

与国外相比,我国对垂直轴风力机的研究比较少,虽然在 20 世纪 80 年代一些学者和研究机构曾经对达里厄风力机进行过研究,但并未受到广泛的重视。近年来,随着国际风能界对垂直轴风力机的日益关注,又有一些学者和企业开始进行垂直轴风力机的研发工作,我国垂直轴风力机的发展正面临着前所未有的机遇。(连载待续)