

创新·严谨·团结·奋进

当前位置：首页 > 科学传播 > 力学园地 > 释疑解惑

释疑解惑

【释疑解惑】风力发电机是怎样工作的？

发布时间：2024-06-13

《力学园地》编辑部：

我希望知道更多一些有关风力发电的知识，请介绍一下，好吗？

一个退休老者

2024年春节之际

风力发电机是怎样工作的？

萤火 怡心

人们在日常的生产和生活中都离不开电，充足的电力供应是一个国家和地区经济发展的重要前提条件。目前，全球一次能源的主要来源是化石燃料，所谓的“化石燃料”包括煤炭、石油和天然气。它们和化石一样，来源都是古生物的遗体，都是经历了复杂的化学变化或者“矿化”作用而生成的（所以也称之为“矿石燃料”）。化石燃料的主要成分是碳，燃烧后会排放二氧化

碳、一氧化碳等有害气体。由于化石燃料是一种不可再生资源，所以“化石能源”的资源越来越贫乏，加之对环境会造成污染，因此人们在寻求各种“绿色能源”，以确保社会的可持续发展。绿色能源也叫清洁能源，是指不排放污染物、能够直接用于生产、生活的能源，它包括核能和各种“可再生能源”。后者是指原材料可以再生的能源，包括水力发电、风力发电、太阳能、生物能等。此外，地热能、潮汐能等也属于可再生能源的范畴。这里，只集中谈谈和风力发电相关的事情。



图1 矗立在川野上的风力发电机（图片来源：网络）

我国作为能源使用大国更是体现了大国担当的格局，在向全世界郑重宣布“碳达峰”“碳中和”的目标下，作为新能源中的风力发电迎来了高光时刻。当我们在陆地、大海中旅游的时候，往往可以看见那不断转动着巨大叶片的风车，它们其实就是风力发电机。那么你知道它的工作原理吗？不过，在深入讨论风力发电机之前，咱们先说说什么是碳达峰和碳中和吧！“碳达峰”是指环境中二氧化碳的排放不再增长，达到了峰值。而“碳中和”则是指二氧化碳排放达到了峰值之后开始下降，最终实现零排放。这里的“零排放”，并不是指不排放，而是通过使用可再生能源、可回收材料、提高能源效率以及植树造林、碳捕捉等方式，将自身的碳排放“吸收”掉（或者说，正负抵消），达到相对的“零排放”。所以，风力发电就是实现“双碳”目标的途径之一。

用力学的语言来说，风力发电机是将风能转换为机械能、再转换为电能的一种电力设备。广义地说，风能来源于太阳能，所以也可以说：风力发电机是一种以太阳为热源、以大气为工作介质的热能利用发电机。风力发电机

组一般由叶片、机舱、塔筒等基础部件组成，人们也常常戏称它为“风车”。图2给出典型风力发电机的结构示意图。其中“叶片”可以随风旋转，一般是三片；“机舱”里装有齿轮箱等传动机构、发电机和配电装置等；而“塔筒”则是支撑结构，并将电能传输到电力供应系统中。根据旋转轴的不同，风力发电机主要分为水平轴风力发电机和垂直轴风力发电机两类，目前市场上水平轴风力发电机占主流位置。图3则给出一个水平轴风力发电机的机舱结构示意图。

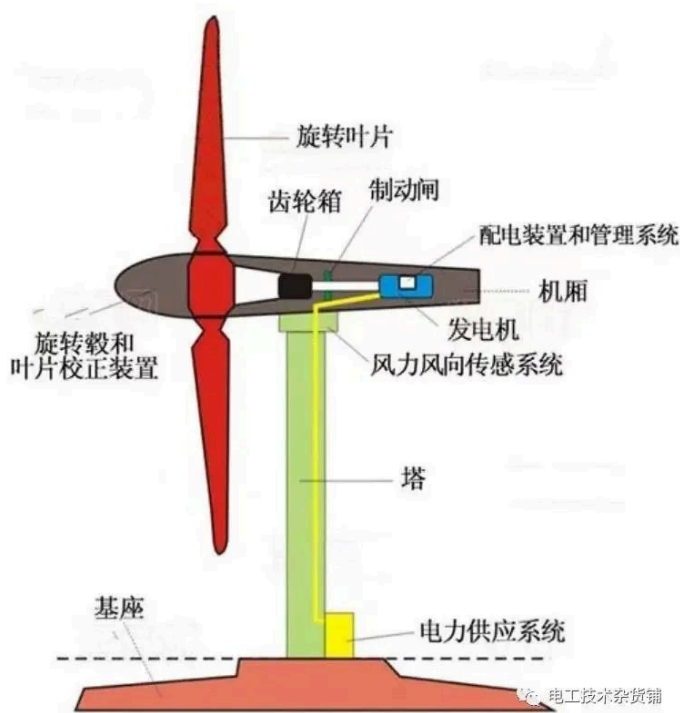


图2 风力发电系统结构示意图（图片来源：网络）

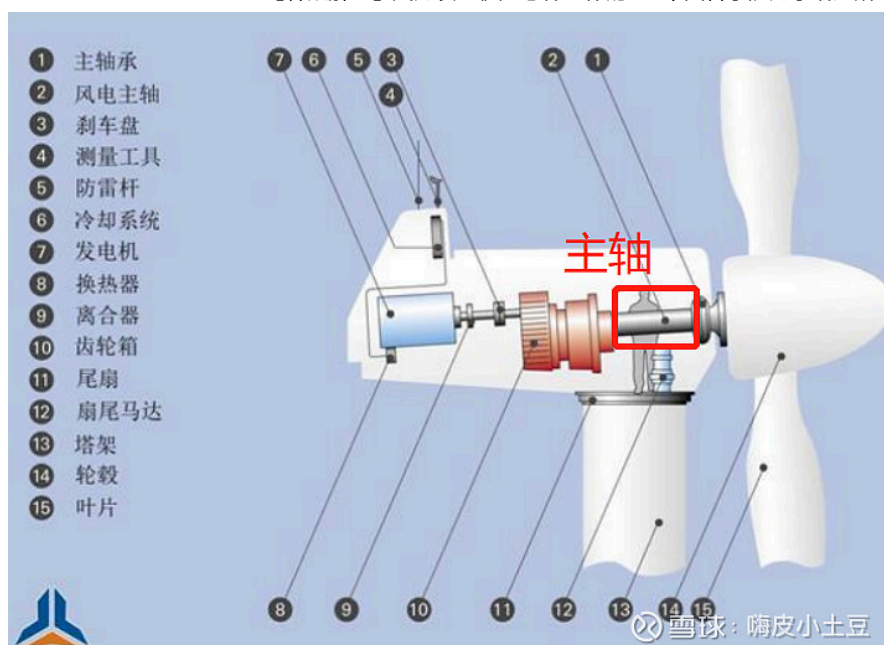


图3 风力发电机机舱的结构示意图（图片来源：网络）

至于风力发电机的发电原理，其实和中学里学到的发电机原理是一样的：当转子在磁场中运动时切割磁力线时，由于法拉第电磁感应原理，转子上的感应线圈就会产生电动势，从而产生电流（参见图4）。只是在风力发电系统中，转子是靠旋转叶片带动的，叶片则是靠风力带动的。风车叶片旋转，风能就转化为机械能，这个机械能通过传动机构送达发电机的转子，发电机再将机械能转化为电能。每个塔架上风车产出的电能，通过集电线路输送到风电场升压站，升压后再输送到电网，就可以变成千家万户使用的清洁风电了。

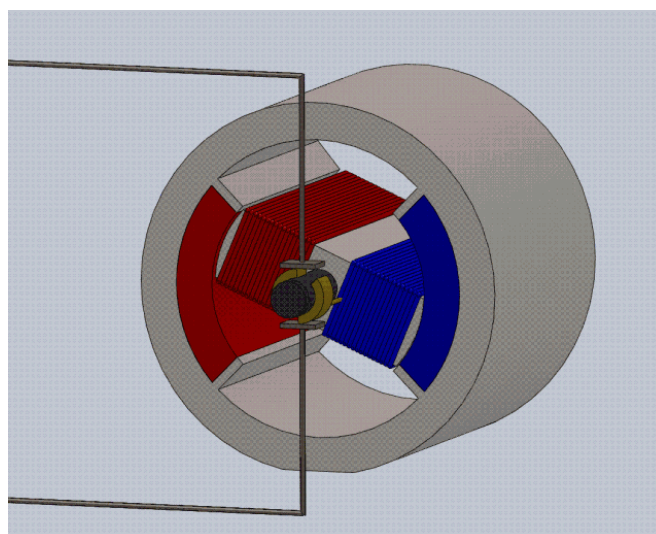


图4 发电机工作原理示意图（图片来源：网络）

很多人可能会好奇，风车叶子转一圈，能发多少度电？在一般情况下，风速只要达到3米/秒（“微风”量级），风车就可以旋转发电。目前主流风车的单机容量从1.5兆瓦到10兆瓦不等。以2兆瓦的风力发电机组为例：叶片长50 - 60米，以额定转速运行时，转动一圈约4秒钟，叶尖速度约280千米/时，堪比动车速度，叶轮转动一圈约发电2.2度。当然，风车的叶片越大，受力就增加，功率就越大，相应发电量就越多。一般而言，由于风量是不稳定的，风车输出的交流电电压也是不稳定的，一般在13 - 25伏的范围内。所以，往往还要经过整流，再对蓄电池充电，使风力发电机产生的电能变成化学能；然后用有保护电路的逆变电源，把电瓶里的化学能转变成交流220伏市电，才能保证稳定使用。或者，如前面所提到的，通过集电线路输送到风电场升压后并网供电。

那么，风力发电是不是风越大越好呢？根据能量守恒定律可以知道，风速越大风能越高，可转换的电能的的确是越多。但是，当风速超过风车限定速度时，风车就要停止工作。因为叶片转速越快，叶片所承受的离心载荷也就越大，当载荷超过叶片所能承受的最大载荷时，叶片就会断裂。这里离心载荷的定义是：在旋转机器设备运行时，由于离心效应对结构施加的载荷。而且事实上，发电量不完全取决于叶片转速。因为风力发电机机组中存在一个类似汽车变速箱的装置，比如变速箱挂到1档，那么即使叶片转速非常快（相当于油门踩到底），但通过变速箱传动到发电机装置当中仍然是较为恒定的低速（相当于车子还是跑不快）。有了这么一个装置，便对叶片起到了保护的作用。

我们知道风力发电有陆上和海上之分，那么这两者有什么差别呢？一般来说，海上风电场是陆上风电场建设成本的两倍，运维费用是陆上风电场的2-4倍。这主要是由于海上施工条件差，施工难度高，再加上海上风电装置远离岸边，台风、风暴潮等不利海况会对风电系统的运行维护带来较多的困难。虽然说海上风电场前期投入比陆上风电场大，但是大海广袤无垠，具有

丰富的风能资源，海上风电发电的利用小时数高、不占用土地、不消耗水资源，适宜大规模开发，发电效率普遍比陆上风电高出20% - 40%。相对来说，小容量风电系统都在陆地上，大容量风电系统都在海上。



(a)



(b)

图5 大型风电场：(a) 陆上；(b) 海上（图片来源：网络）

这里仅以桩基为例，简单解释一下，海上风电系统建设困难所在，其中“桩基”是指风车塔筒在水下部分。图6是海上单桩风车的图示，它承受着巨大的风荷载以及波浪和海流的联合作用。海床和陆地的性态是不一样的：海床

土体通常处于饱和含水状态，土体一般更为软弱，而且往往是砂质的，在其上方的海流作用下，还会形成冲刷坑，十分不利于基础承载。俗话说“根基不牢，地动山摇”。对于海上风车这类“高耸结构”而言，更是如此！如何确保海上风电系统的安全，便是力学工作者的任务了。

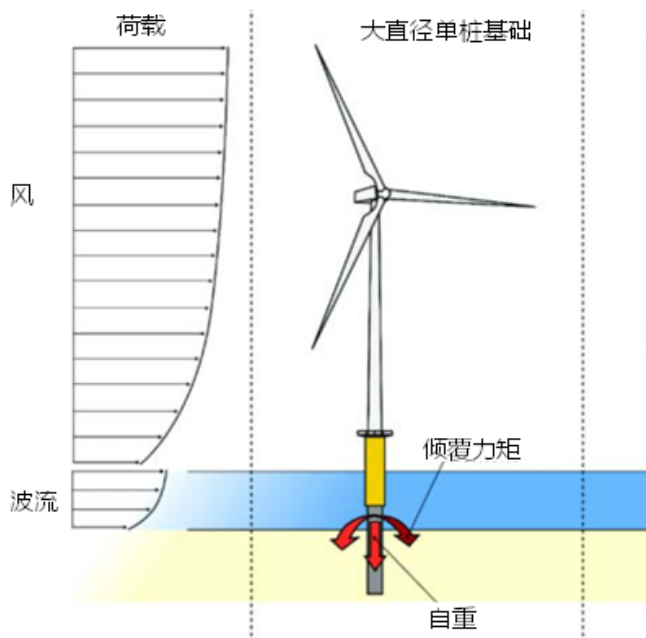


图6 海上风力发电机桩基示意（图片来源：文献[4]）

中国科学院力学研究所的研究团队建设了大型水槽，可以用来进行模型试验以观察桩基的冲刷演化过程（参见图7）。可以看到，在桩基附近，形成了马蹄涡，下游方形成尾迹涡，桩基周围马蹄涡等扰动流场极易诱发海床土的淘蚀，从而导致冲刷坑的形成。力学所研究团队还开展了数值模拟研究，给出了圆柱桩基前缘对称面内的马蹄涡系典型流动结构（参见图8）。这个研究结果也得到了现场实测结果的验证，图9是根据工程实测的海上风车单桩基础冲刷数据制作的云图。以上就是力学工作者从事海上风车桩基稳定性研究的一个大体流程。所以，大型工程必须要有科学的支撑。

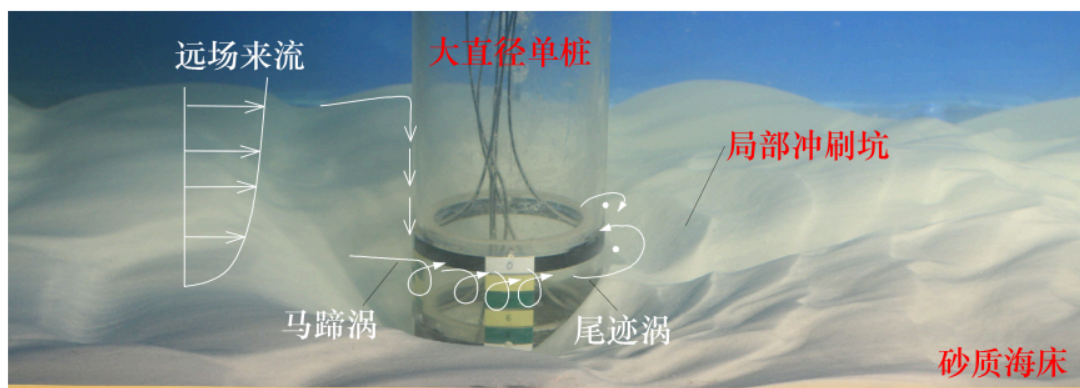


图7 水槽中模型试验观测的桩基冲刷动力演化过程（图片来源：文献[4]）

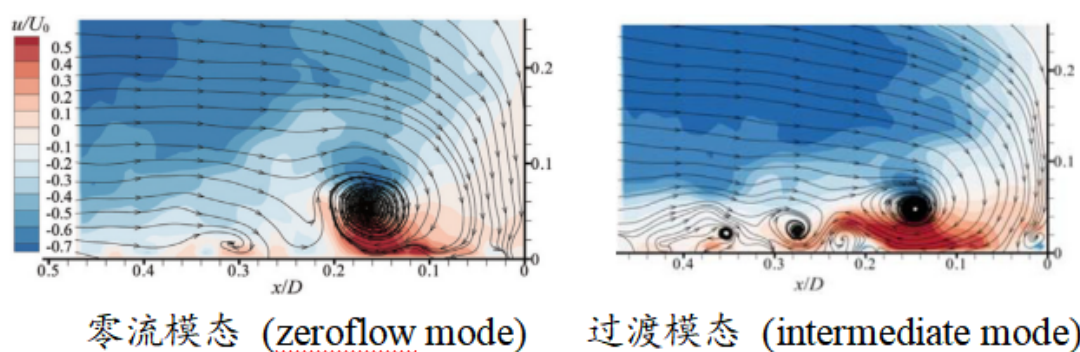


图8 水流作用下桩基前缘对称面内的马蹄涡系结构（图片来源：文献[4]）

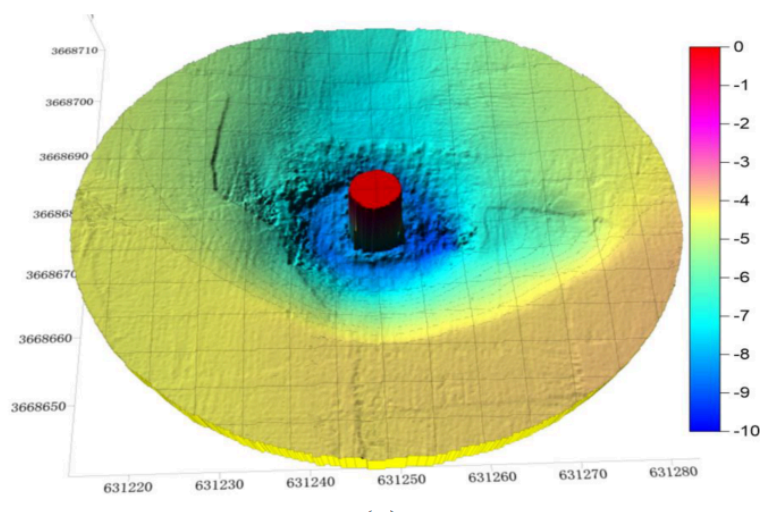


图9 工程实测的海上风机大直径单桩基础冲刷（图片来源：文献[4]）

风力发电与常规发电相比，尽管有一些缺点（如受地域和天气的影响大），但具有能源充足、不消耗燃料、无环境污染、占地面积小、工程建设周期短、发电技术成熟等优点。虽然前期投入较大，但相比水电和火电，后

期维护、管理费用低，是目前新能源领域中技术最成熟、最具规模开发条件和商业化发展的发电方式之一。

参考文献

[1] https://mp.weixin.qq.com/s/a2HyZXU4cVo3_PrHk6aSqqQ

[2] https://mp.weixin.qq.com/s/fP_krFx3AAND6faZkdH5zw

[3] <https://mp.weixin.qq.com/s/-HiD0ntunhOm8dFDPa-49A>

[4] https://imech.cas.cn/science/lxyd/qy/202302/t20230228_6686348.html

下一篇：[【释疑解惑】风洞究竟是什么？](#)

版权所有 © 2024 中国科学院力学研究所 京ICP备05002803号-1 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮政编码：100190

