



新能源与环保技术

NEWENERGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY

国家级职业教育教师教学创新团队共同体

风力发电工程技术专业

课程拓展资源

湖南电气职业技术学院



在内蒙、甘肃、河北、吉林、新疆、江苏、山东等省区建设大型风电基地



基本知识风力发电机 (2)

制作单位：湖南电气职业技术学院

制作时间：2022年9月

目录 Contents



PART 01

风力机基础知识



PART 02

风的测量



PART 03

风力机的原理与组成



PART 04

叶片的气动特性



PART 05

风轮实度



PART 06

机舱设备与塔架



PART 07

风力机对风装置



PART 08

风力机调速方式



PART 09

独立变桨距系统



PART 10

齿形带传动变桨



目录 Contents



PART 11

[统一变桨驱动机构-1](#)



PART 12

[统一变桨驱动机构-2](#)



PART 13

[直驱式风力发电机](#)



PART 14

[双馈风力发电机组](#)



PART 15

[扩散放大器风力机](#)



PART 16

[高空风筝风力发电机](#)



PART 17

[圆柱齿轮增速箱](#)



PART 18

[行星齿轮增速箱](#)



PART 19

[风力发电机的轴承](#)



PART 20

[水平轴风力机图片](#)



08

风力机调速方式

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

偏转风轮调速

风是不稳定的，不但会影响发电机的输出，在强风时还会烧毁发电机，甚至摧毁风力机。所以风力机要有应付风速大幅度变化的能力，还要有对付强风速（超过切出风速）的安全防范措施

在风力增强时使风轮偏转为侧面向风是一些小型风力机采用的抗强风方式，图1是一种向上仰头的小型风力机，发电机（含风轮）通过风轮上仰构件连接尾舵，上仰构件通过一个水平横轴安装在偏转平台上。其特点是尾舵杆向上翘起，在尾端有尾舵，尾舵与地面垂直或略向前倾。

在正常工作风力时尾舵仅起偏航（对风）作用，发电机在尾舵作用下通过偏航平台下面的轴承绕塔杆转动，实现对风，风轮以正常转速运行。

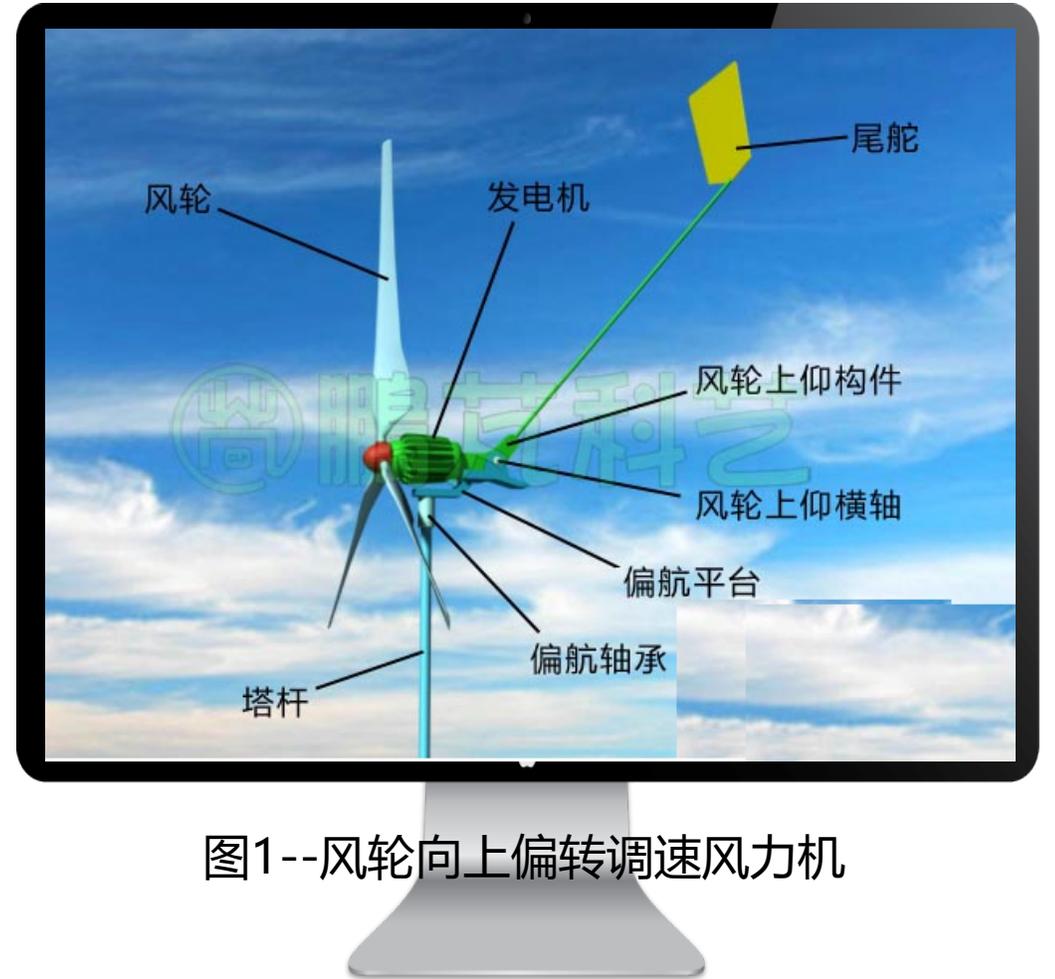


图1--风轮向上偏转调速风力机

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

偏转风轮调速

风力超过额定风速时，尾舵在大风作用下，绕风轮的上仰横轴向下方偏转，带动风轮向上偏转（仰头），风轮有效受风面积减小，限制了风轮转速上升，见图2。当风减小时，风轮向水平方向偏转，风轮有效受风面积增大，转速不会明显下降。这样，在风力超过额定风速但不超过切出风速时，通过仰头调节风轮受风面积，使风速变化对风轮转速影响较小，可保持风轮转速在较小范围内变化，见图2。

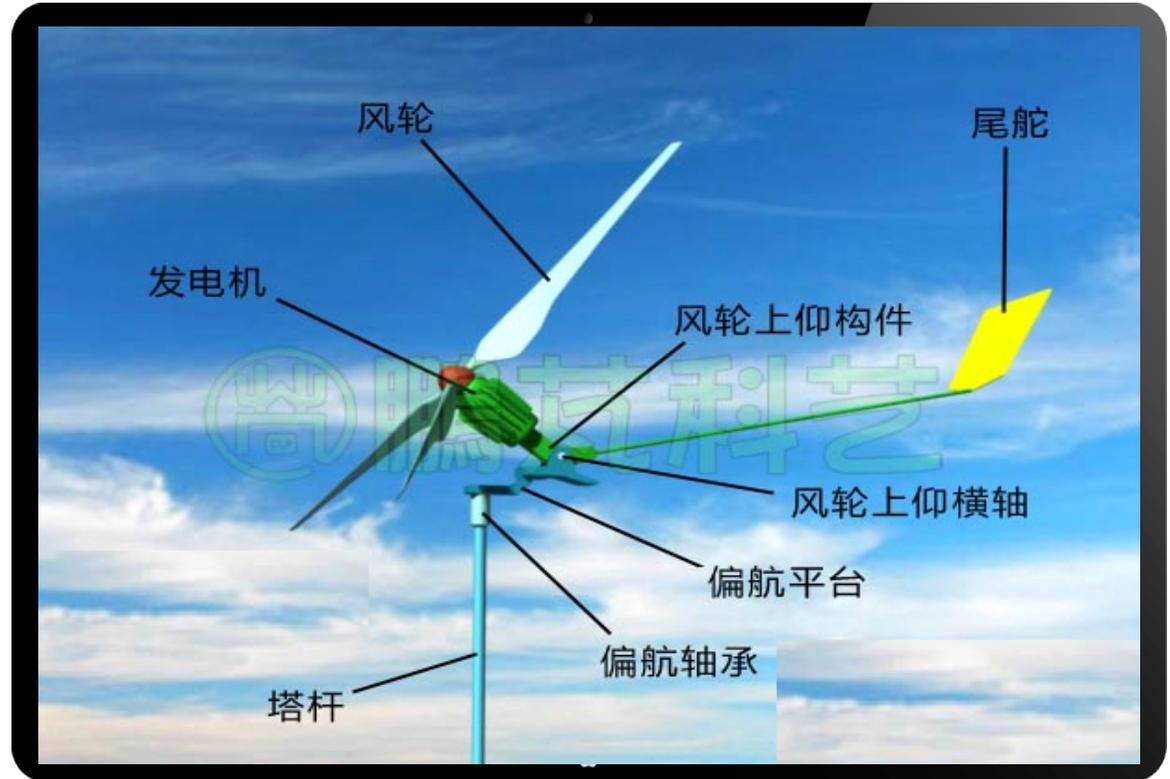


图2--大风时风轮向上偏转

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

偏转风轮调速

当超过切出风速时，尾舵被压向最下方，此时风轮面接近水平，受风面积接近零，风轮停止旋转，进入保护状态，见图3。

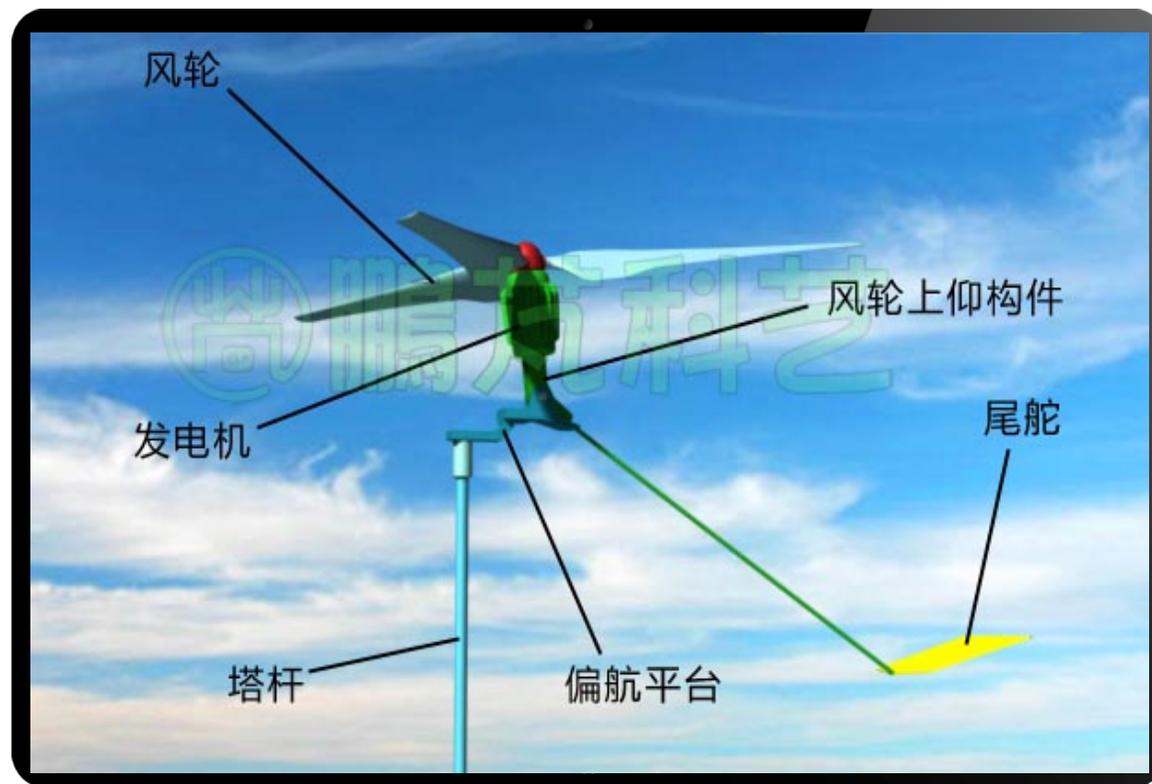
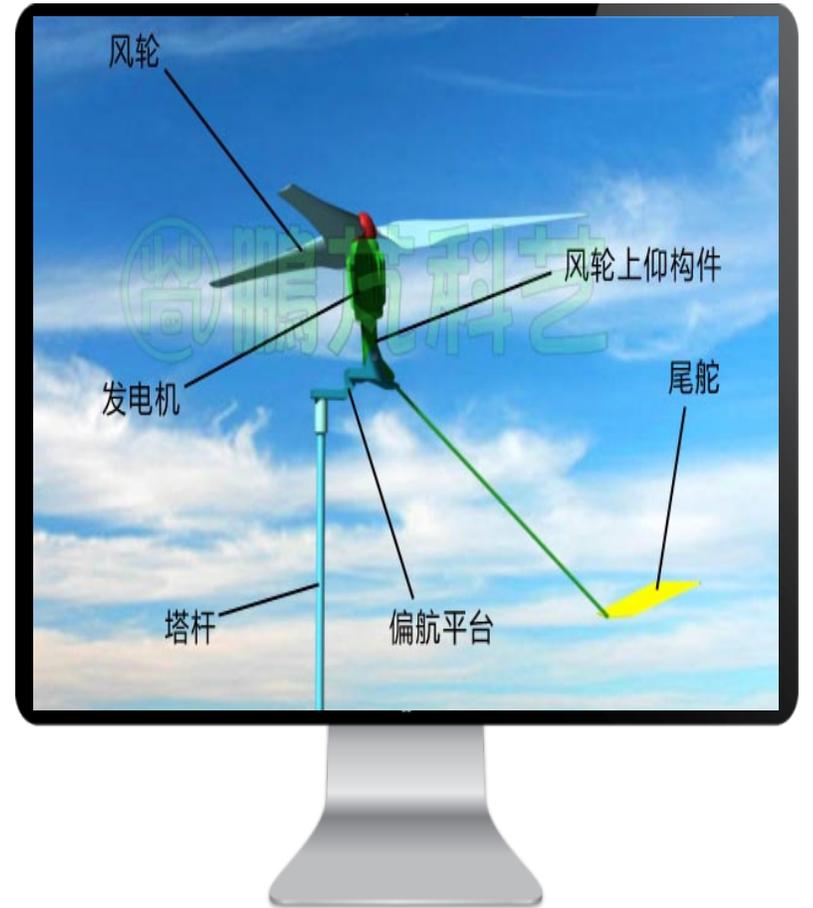


图3--强风时风轮偏向水平

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

偏转风轮调速

偏转风轮的还有其他方式：尾舵直接固定在偏航平台上，只起对风作用，发电机（含风轮）的上仰横轴在发电机下方，安装在偏航平台上，依靠弹簧的力量使发电机轴在水平状态，这也是正常风速时的状态。大风时风轮在推力增大到一定程度，克服弹簧力量，风轮面向后倾斜，有效受风面积减小，限制了风轮转速上升；风减小后，风轮在弹簧作用下返回水平位置。工作过程与靠尾舵仰头的风力机相似。也可把发电机的偏转轴设在侧面，同上面结构类似，在弹簧作用下发电机轴与尾舵杆平行，尾舵杆固定在偏航平台上，保持在对风状态，此时风轮面向来风，处于正常工作状态。大风时风轮在推力增大到一定程度，克服弹簧力量，风轮面向侧面倾斜，有效受风面积减小，限制了风轮转速上升；风减小后，风轮在弹簧作用下返回正常位置。这种靠风轮偏转来改变有效受风面积进行调速的方式简单可行，在小型与微型风力发电机中得到应用。



风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

失速控制转速

风力机叶片本身也有一定的调速能力，在风速增大，叶片进入失速状态也可限制转速上升，许多小型风力发电机工作在定桨变速模式。

叶片固定在轮毂上，正常运行时风小转速低、风大转速高，当风速增大转速超过额定转速时，则通过失速来扼制转速的飙升、保护发电机，称这种运行方式为定桨变速加失速模式，这种模式在中型风力机也有应用。下面来分析一下这种失速控制转速模式的基本原理。

图4是一幅翼型的升力系数与阻力系数随攻角的变化曲线图，在曲线中可看出，翼型在攻角 α 大于11度时开始失速，升力骤然下降，阻力大幅上升，开始失速的攻角 α 的值称为失速角。

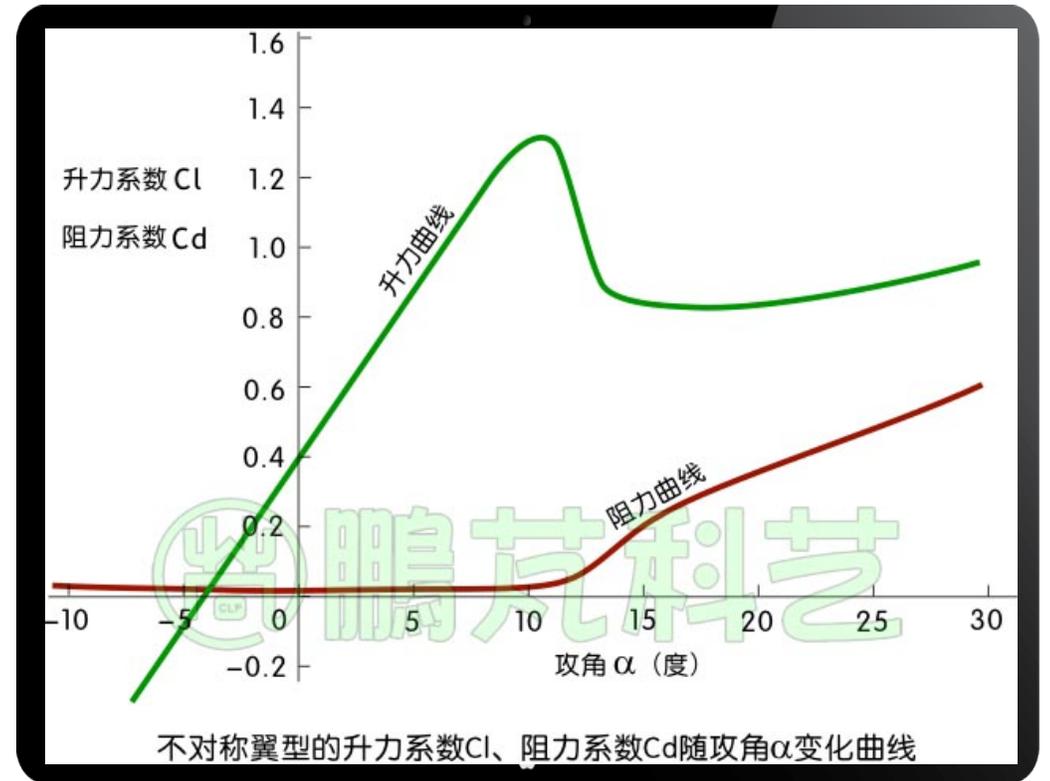


图4--翼型的升力系数与阻力系数曲线图

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

失速控制转速

图5是一台风力机桨叶的截面（翼型）受力分析图，该翼型弦线与风轮旋转平面的固定夹角 β 称为桨距角，对于固定桨叶桨距角是不变的。相对翼型的风速是外来风速 v 与翼型线速度 u 合成的相对风速 w ，相对风速 w 与翼型弦线间的夹角 α 是翼型的攻角。

图5左图是翼型运行在允许的风速之内（额定风速）时状态，翼型的攻角 α 应小于失速角（11度）。翼型升力 F_l 与阻力 F_d 的合力为 F_1 ， F_1 在风轮旋转平面上的投影 F 就是推动翼型运动的力。风速 v 低时攻角小，则 F 小就转速低；风速 v 高时攻角大，则 F 大就转速高。

当风速超过额定风速大幅度上升时，风轮转速由于负荷不可能大幅度上升时，翼型因攻角 α 大于11度后进入失速状态，图2右图就表示了这一状态。尽管风速 v 加大许多，但升力 F_l 却下降了、阻力 F_d 大大增加了，结果是 F 反而减小了，从而抑制了转速的上升。

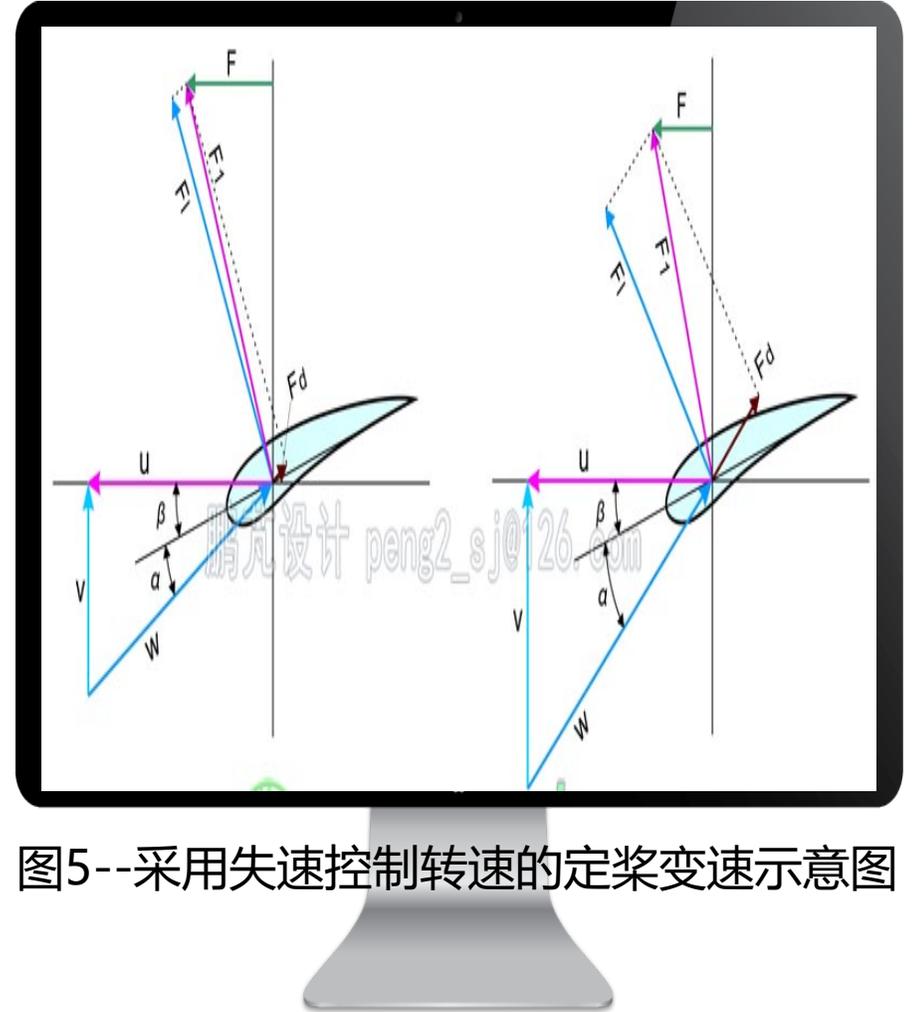


图5--采用失速控制转速的定桨变速示意图

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

失速控制转速

失速是翼型运行在非正常状态，是不稳定的状态；而且失速角也不是一成不变的，它受到空气湿度、温度等变化的影响，例如空气湿度增大或桨叶上附有灰尘时失速角就会减小、升力系数就会下降；再说翼型失速后再返回失速前的攻角时并不是沿原曲线返回，所以失速是不可能稳定的控制转速，失速控制的范围也是有限的。为了在低风时起动风力机，叶片要有一定的攻角，这会减小风轮运行叶尖速比范围，影响风力机效率的发挥。

采用定桨失速方式可在一定范围内防止风轮转速的急速上升，但并不具有抗强风能力。要抗强风要求叶片必须有足够的强度、风轮有良好的刹车性能，在强风来临时把风轮侧面向风、刹车，才能有效减小强风带来的损失。

但这种模式运行的风力机结构简单，造价低是其优点。

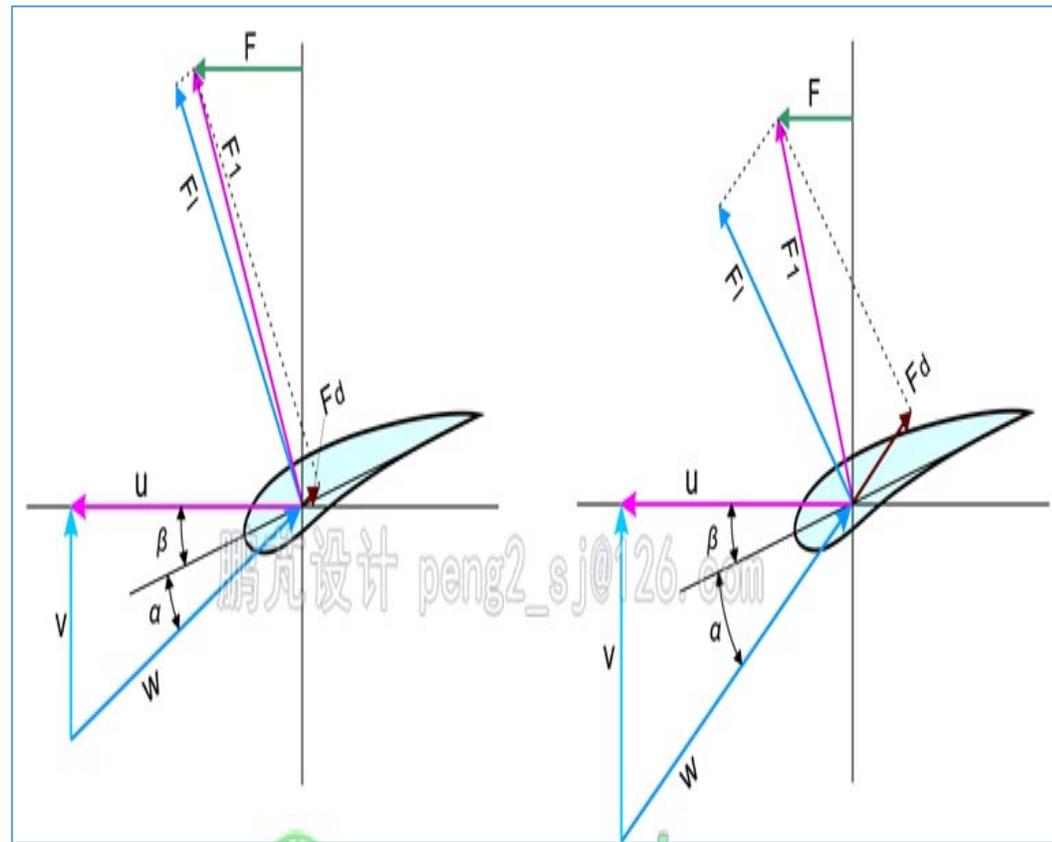


图5--采用失速控制转速的定桨变速示意图
(正常工作状态与失速状态)

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

变桨距调节转速

变桨距调节转速是当前大中型风力机广泛使用的调速技术，可使风力机在风速超过额定风速时，风力机转速稳定在额定转速。图6就是变桨距翼型受力分析图，图6左图是翼型在额定风速时运行在额定转速时的状态，与图6左图所示状态一样，此时有最大的推力 F 。图6右图是翼型运行在高风速时的情况，如果翼型角度不变就会进入严重的失速状态，但此时翼型的桨距角 β 增加了 $\Delta\beta$ ，使攻角 α 维持在不失速状态，调节合适的 $\Delta\beta$ 可使推力 F 与失速前一样。这就是通过变桨距角来调节风轮转速的方式。

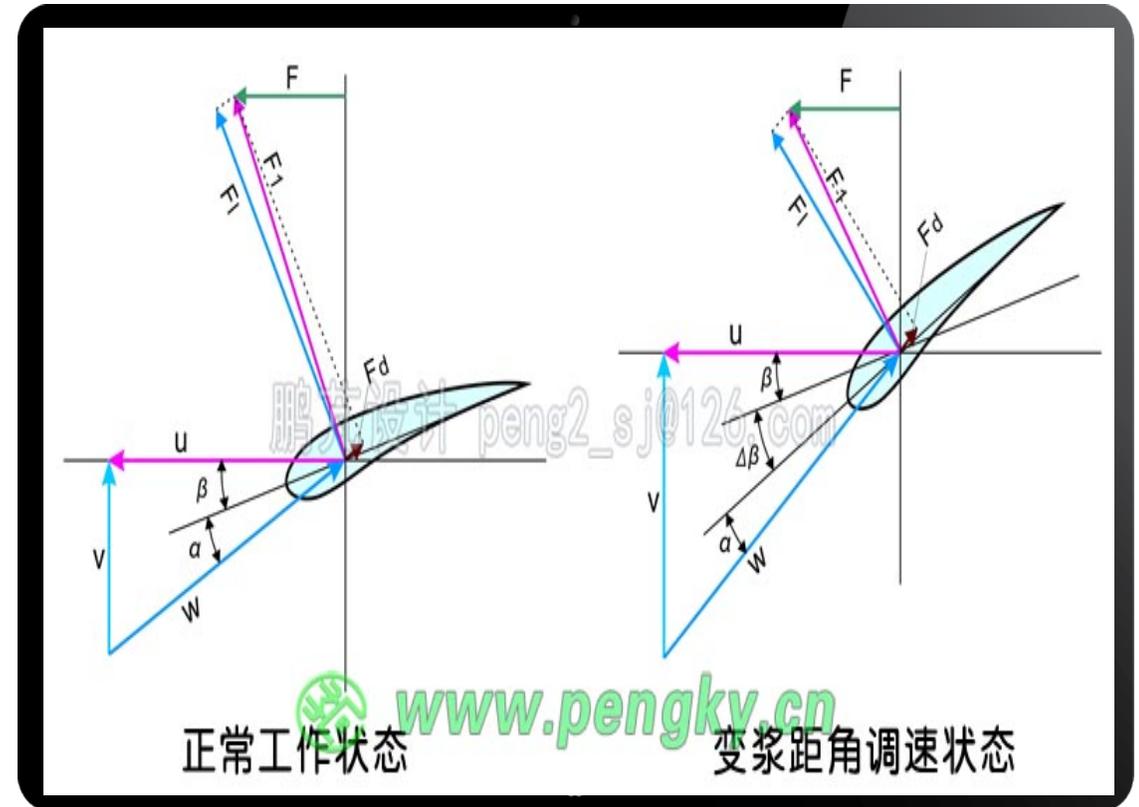


图6--变桨距调节转速示意图

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

变桨距调节转速

有变桨距调节转速功能的风力机在低于额定风速时，工作在定桨变速状态（需要时也可工作在变桨变速状态）；在风速超过额定风速就要工作在变桨定速状态。显然，只有在额定风速或超出额定风速时才可能实现风力机转速的稳定。大中型风力发电机多是直接并网的工作状态，要保证发电机转速要与电网频率同步，实际上靠变桨来实现风力机转速非常稳定是困难的，除非在风速稳定（风速变化缓慢）的地区。

现在流行的是变速变桨模式，所谓变速就是指发电机在较低的风速较以低的转速时开始发电，转速随风速增加，一直到额定风速，此时虽未进入失速状态但仍可选择合适的桨距角使发电机输出最大功率；当风速超过额定风速时则通过增大桨距角以保持转速稳定在额定转速附近，使输出功率稳定在一定范围内。此时可通过[双馈发电机](#)使输出频率与电压与电网频率与电压相同；或通过[逆变器](#)使输出频率与电压与电网频率与电压相同，达到所谓变速恒频运行模式。所以说变速变桨模式使风力机从低风到较高的风力下均可发电，大大提高了风力发电的效率。

完整的变桨距调节系统在遇到强风时可把桨叶调为顺风状态，即叶片的主要段弦线与风轮轴线平行，称为全顺桨状态，此时叶片迎风面积最小，风轮受风力作用大大减小，而且叶片的阻力可使风轮迅速停转（空气动力学刹车），有效地保护风力机安全。

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

离心力桨距调节装置

下面介绍一种简单的桨距角调节方法，在风轮轮毂上按120度分布3个变桨轴套，3个叶片的根部通过轴承安装在3个变桨轴套内，可在轴套内自由旋转；轴套内有弹簧与限位装置，使风轮叶片处于正常工作角度，见图7。图中左图是风力机正面图，右图是风力机透视图，图8是叶片轴线方向的视图，左图清楚地显示了此时叶片的角度。在额定风速以下时，离心摆锤所受离心力在绕叶片转轴方向的力矩不足以克服弹簧力，叶片保持在正常工作的桨距角。

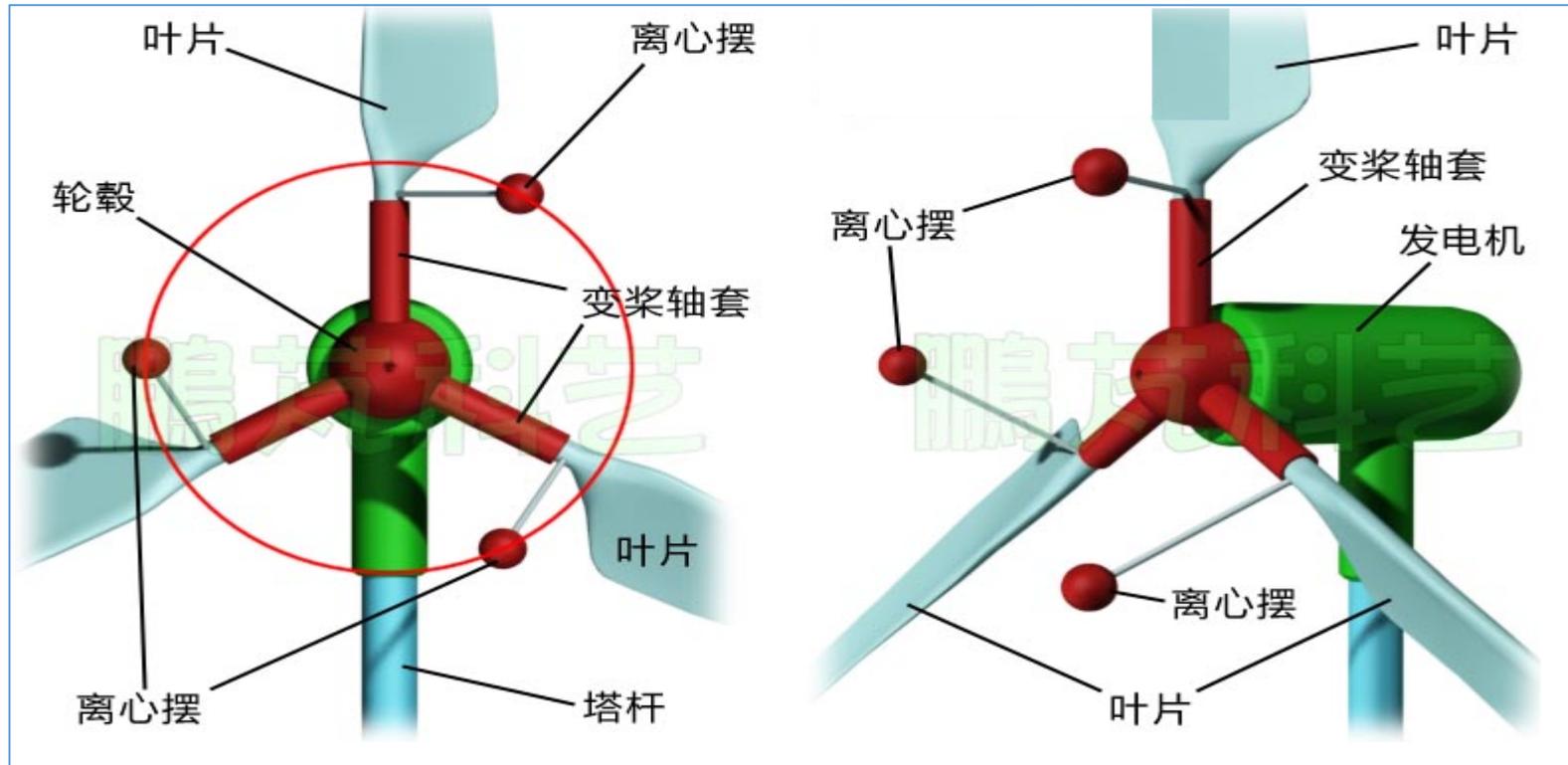


图7--离心力调节桨距角的风力机

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

离心力桨距调节装置

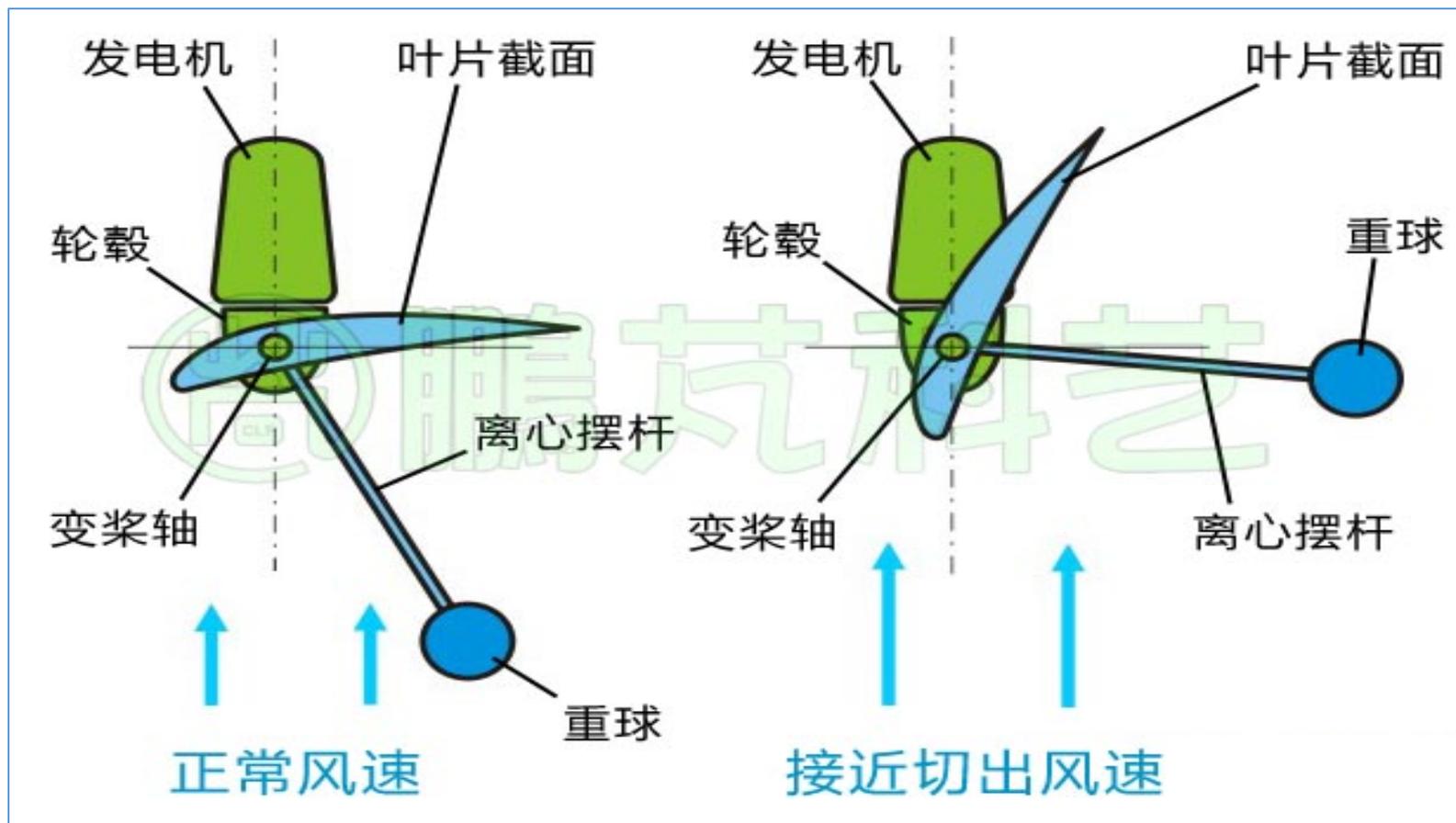


图8--离心力调节桨距角风力机原理

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

离心力桨距调节装置

当风速超过额定风速时，离心摆锤所受离心力增大，在绕叶片转轴方向的力矩克服弹簧力使桨距角增大，使风轮转速增幅大大减慢，直到切出风速，离心摆锤使叶片桨距角增大到接近顺桨位置，见图8右图。图9显示了接近顺桨的状态，在左边正视图中有一个红色的圆圈，表示此时离心摆锤距风轮轴线的距离（离心摆锤的旋转半径），显然比图7左边图的红色的圆圈半径大得多，这就是离心摆锤在高转速时增大旋转半径使叶片偏转的原理。

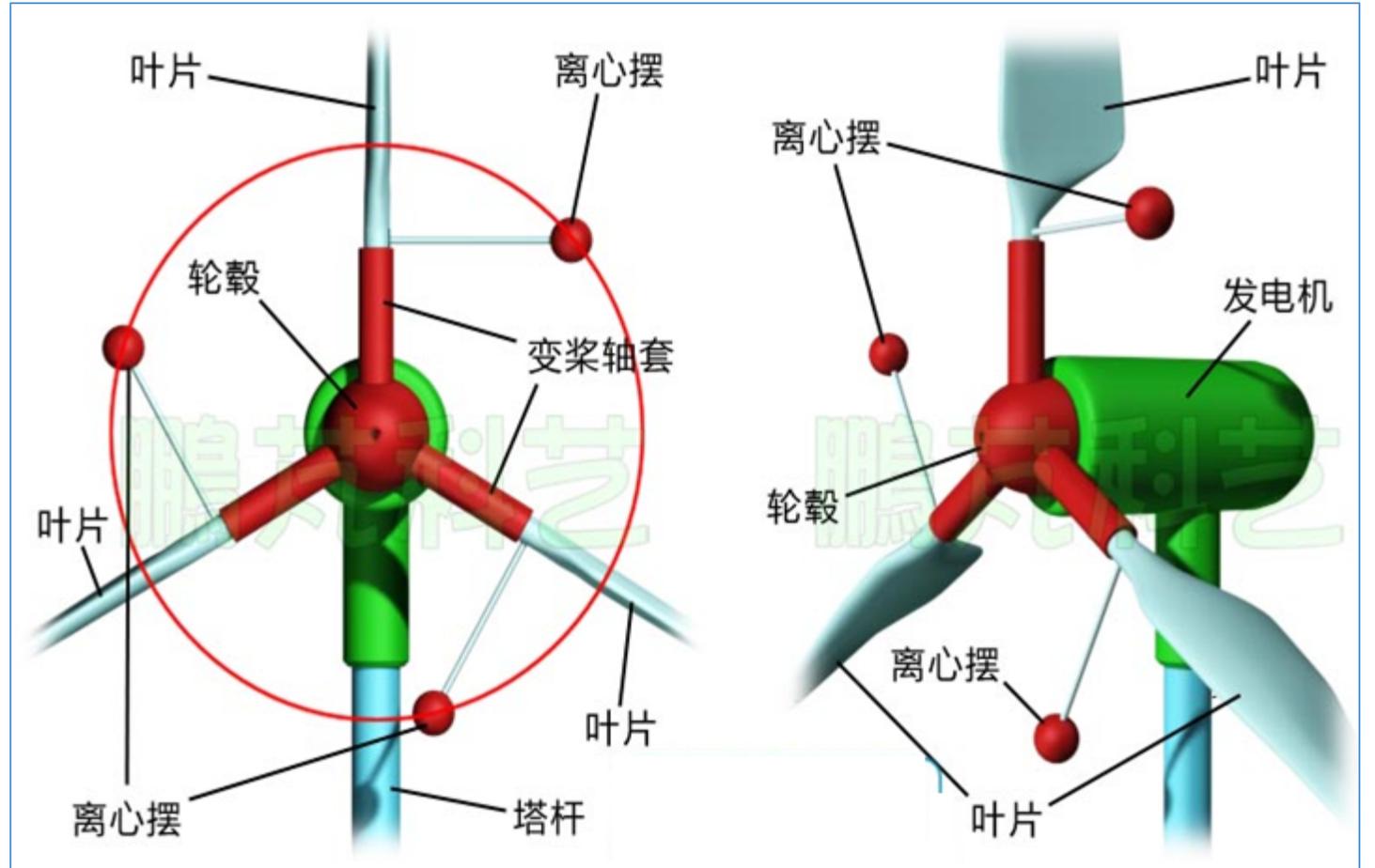


图9--离心力调节桨距角风力机的顺桨状态

风力机调速方式 (*Adjust the Speed Mode*)

离心力桨距调节装置

离心力桨距调节装置较简单，但在超出切处风速时仍不停高速旋转，需辅以叶片转角锁定机构在强风时把叶片锁在顺桨状态，方可使风力机停转，保证风力机的安全。离心力桨距调节装置可用在小型风力发电机中。

在较大的风力发电机中采用统一变桨距机构或独立变桨距系统，通过电动或液压驱动变桨，采用计算机进行控制，才能实现真正的变桨调速功能，图10是电动变桨距系统的图片。

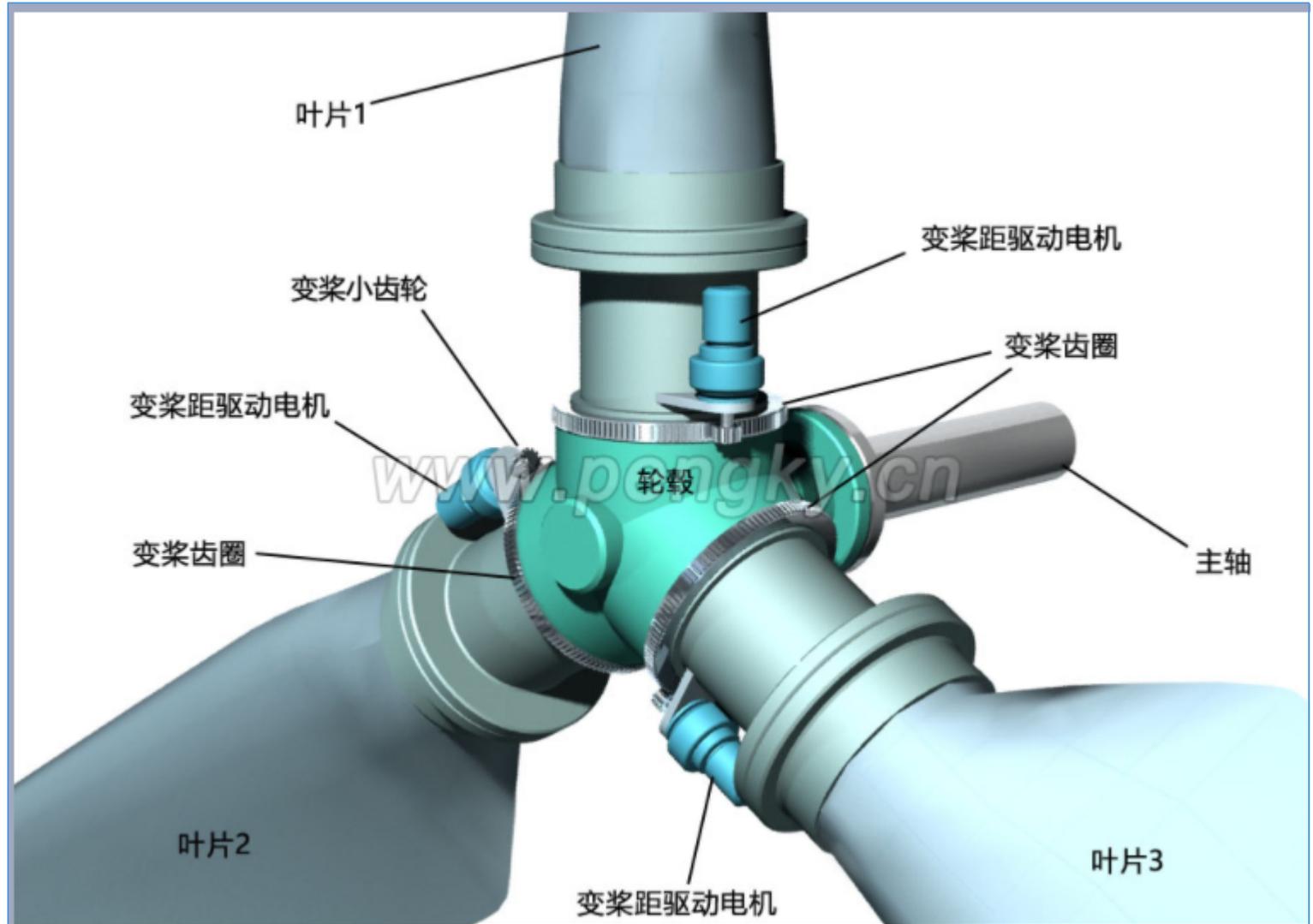


图10--电动变桨距系统

