

VORTEX

无叶片风力发电技术详解

白皮书

(Version 1.3)

上海沃振能源科技有限公司

2025 年 8 月

目录

一、 风力发电原理与能量转化	4
1.1 风力发电的一般原理.....	4
1.2 风能功率公式.....	4
1.3 电功率计算公式.....	5
1.4 无叶片风杆发电原理.....	5
1.4.1 发电原理:	6
1.4.2 按能量守恒:	6
1.4.3 转化效率(参见图三):	6
1.5 Vortex Atlantis Slim 发电效率.....	7
1.5.1 Atlantis Slim 10米高的发电功率(参见表一)	7
二、 VORTEX 无叶片风机的“黑”科技	8
2.1 风速千变万化, 追寻“共振”不间断.....	8
2.1.1 共振的基础机制: 调频结构设计	8
2.1.2 自调谐能力: 动态响应风速变化	9
2.1.3 阻尼机制优化: 扩展有效风速窗口.....	10
2.2 振动转化为电能.....	10
2.2.1 电磁感应过程	11
2.2.2 电磁感应原理, 从旋转变为摇摆	11
2.2.3 结构设计理念	12
2.2.4 能量转换效率	12
2.2.5 与储能系统的耦合	13
2.3 VORTEX 风机的“聪明”之处.....	13
2.3.1 “共振”的重要性	14
2.3.2 自动调频: 不是靠芯片, 而是靠结构本身	14
2.3.3 简单打个比方	15
2.3.4 现实意义: 更稳、更省、更强适应.....	15
三、 无叶片风机的特性.....	15
3.1 无叶片风机发电小时数更高的原因.....	15
3.1.1 无叶片风机适应的风域更宽:	15
3.1.2 无叶片风机适应风向变化快:	16
3.1.3 无叶片风机不需要检修维护:	16

3.2 无叶片风机的设计寿命	16
3.2.1 耐久性和稳定性:	16
3.2.2 寿命与更换件:	17
3.3 占地面积、基座抗台风能力、倒伏影响.....	17
3.3.1 占地面积:	17
3.3.2 基座抗台风能力:	17
3.3.3 倒伏影响范围:	17
四、无叶片风力发电技术总结	17

一、风力发电原理与能量转化

1.1 风力发电的一般原理

任何叶片类型的风力发电机都遵循相同的能量转化链条：

风能 ⇒ 动能 ⇒ 机械能 ⇒ 电能

- **风能 → 动能：** 风流作用在结构上，产生推动或转动；
- **动能 → 机械能：** 通过旋转（传统风机）驱动机械系统；
- **机械能 → 电能：** 机械运动带动发电机线圈切割磁力线，产生电流。

而无叶片的风力发电机都遵循类似但简化的能量转化链条：

风能 ⇒ 动能 ⇒ 电能

- **风能 → 动能：** 风流作用在结构上，产生气动结构振动（无叶片风杆）；
- **动能 → 电能：** 通过振动驱动磁环运动于有取向的芯轴线圈产生磁通量变化而发电。

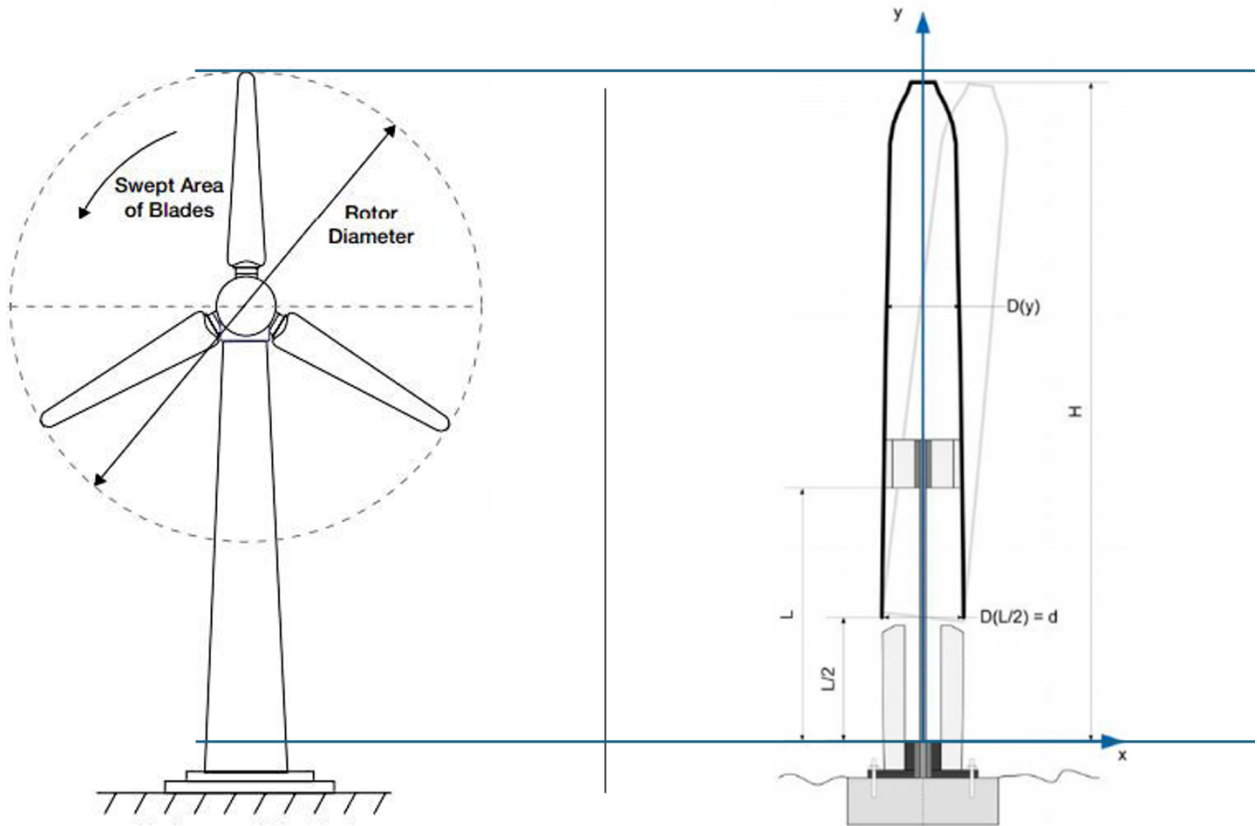
1.2 风能功率公式

风流通过扫掠面积 A 时，所含的动能功率为：

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

- ρ = 空气密度（约 1.225 kg/m³）
- A = 迎风面积（m²）
- v = 风速（m/s）

在同等高度下，通常无叶片风杆的扫风面积是 3 叶片的 1/6。（参见图一）



图一：三叶片风机和无叶片风机扫风面积对比

1.3 电功率计算公式

风能转换到电能，需要乘以两个效率系数：

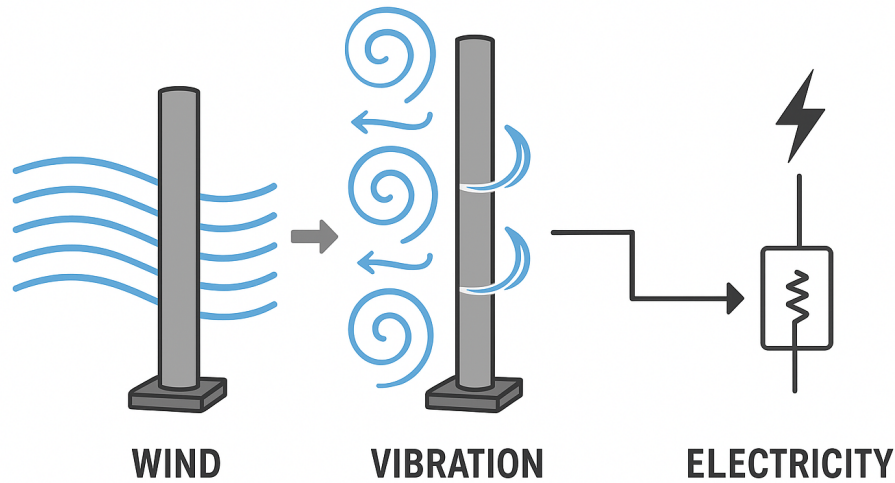
$$P_{\text{elec}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{elec}}$$

- C_p ：风能利用系数（Betz 极限理论上限为 0.593，实际叶片风机一般 0.45，无叶片风杆通常 0.30-0.33）
- η_{mech} ：机械传动效率（无叶片直接驱动可达接近 1）
- η_{elec} ：发电机效率（稀土永磁直驱可达 0.92~0.97）

1.4 无叶片风杆发电原理

无叶片风力发电机利用涡激振动（Vortex Induced Vibration, VIV）效应：当风流经过风杆时，在其背风侧形成交替脱落的涡旋，周期性作用在风杆上，使其垂直于气流方向，横向振动。该振动被内部碳纤维棒体传递到磁钢和线圈组，将振动能转化为电磁感应，并产生电能。（参见图二）

VORTEX-INDUCED VIBRATION



图二：空气吹过圆柱体产生涡激振荡发电

1.4.1 发电原理：

无叶片风杆不是通过叶片旋转，而是利用**涡激振荡效应**或**自激振动效应**，使杆体产生共振振动：

- 风流绕过圆柱形杆体 → 形成交替涡流；
- 涡流激发杆体产生横向振动（摆幅幅度 3.5°，频率随风速变化）；
- 振动能通过**碳纤维杆+磁钢线圈组**转化为电能。

1.4.2 按能量守恒：

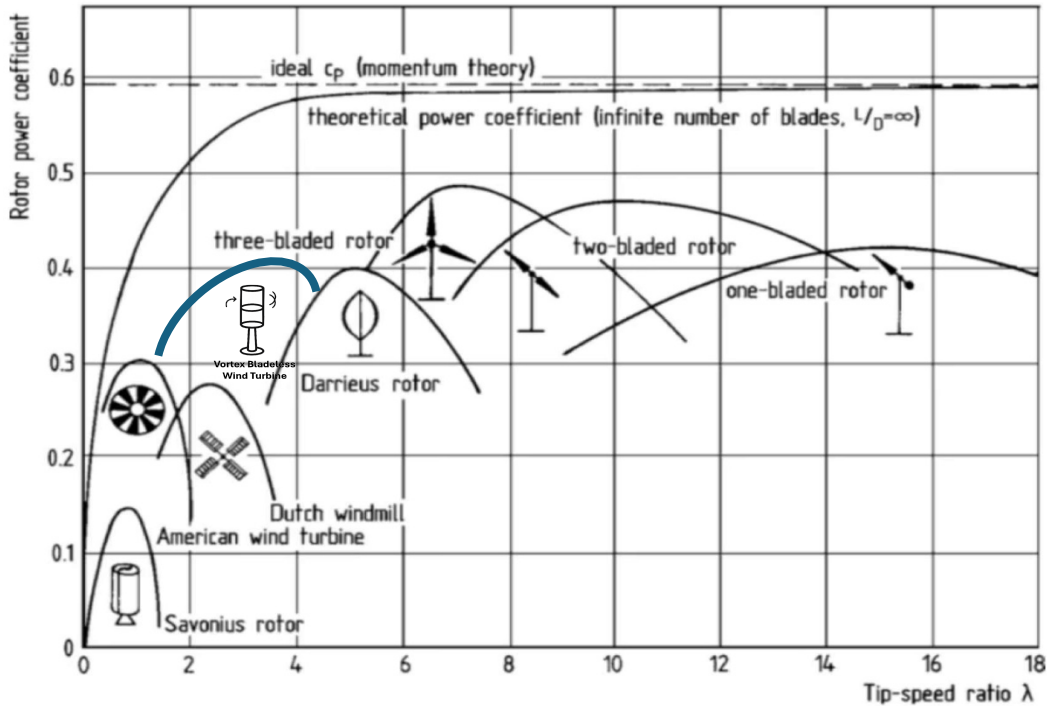
$$E_{\text{风}} \Rightarrow E_{\text{振动}} \Rightarrow E_{\text{电}}$$

- 风的动能一部分转化为杆体振动；
- 再通过发电机（磁钢+线圈）转化为电能；
- 由于无齿轮、无旋转叶片，能量损失点更少，但气动能捕获率比叶片风机低。

1.4.3 转化效率（参见图三）：

- 三叶片风机：
 - 风能利用系数 $C_p \approx 0.45$
 - 电气平均效率： $0.45 \times 0.82 \times 0.90 \approx 33\%$ （30%-35%）
- 无叶片风杆：
 - 风能利用系数 $C_p \approx 0.33$ （取决于振动匹配和发电机构类型）

- 电气平均效率： $0.33 \times 1 \times 0.97 \approx 32\%$ （30%-32%）



图三：各类叶片风机能量转换示意图

所以，更加形象的对比就是，如果一台总高 140 米的三叶片风机的额定功率是 3-5MW，那么一台 140 米高的无叶片风机的额定功率就能接近 1MW。

1.5 Vortex Atlantis Slim 发电效率

Vortex Atlantis Slim 10 米高的无叶片风机是现在国内主推的风力发电产品。主要基本信息如下：

- 风杆高度：10 m
- 风杆直径：40 cm
- 重量：400 kg
- 额定发电功率（单磁钢）：2 KW ~ 5 KW
- 切入风速：3.5 m/s
- 额定风速：6 m/s
- 生命周期：27 年
- 年维护成本：2%



1.5.1 Atlantis Slim 10 米高的发电功率（参见表一）

应用发电功率计算公式：

$$P_{elec} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{elec}$$

- $\rho=1.23 \text{ kg/m}^3, A=10^2 \times 3.14 \times (7.5/360) = 7 \text{ m}^2, C_p=0.33, \eta_{mech}=1, \eta_{elec}=0.97$
- 平均效率系数: $0.33 \times 1 \times 0.97 \approx 0.32$
- 功率输出: $P=1/2 \times 1.23 \times 7 \times v^3 \times 0.32=1.378v^3 \text{ W}$

表一：风速和输出功率对照表

Rated v (m/s)	Aver/rated Speed Factor [-]	Cut-in (m/s)	Cut-out (m/s)	Aver. v (m/s)	$\rho (15^\circ \text{ kg/m}^3)$	A factor	A (m ²)	Wind PF [-]	Electric PF [-]	PoW (W)	Nominal Freqeency [-]
3.50	1.8	1.32	3.99	1.94	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	59.67	1.94
4.50	1.8	1.70	5.13	2.50	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	126.83	2.49
5.50	1.8	2.07	6.27	3.06	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	231.56	3.05
6.50	1.8	2.45	7.41	3.61	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	382.23	3.60
7.50	1.8	2.83	8.55	4.17	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	587.17	4.15
8.50	1.8	3.20	9.69	4.72	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	854.75	4.72
9.50	1.8	3.58	10.83	5.28	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	1,193.30	5.26
10.50	1.8	3.96	11.97	5.83	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	1,611.19	5.82
11.50	1.8	4.34	13.11	6.39	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	2,116.77	6.37
12.50	1.8	4.71	14.25	6.94	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	2,718.38	6.92
13.50	1.8	5.09	15.39	7.50	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	3,424.38	7.48
14.50	1.8	5.47	16.53	8.06	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	4,243.11	8.03
15.50	1.8	5.84	17.67	8.61	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	5,182.93	8.59
16.50	1.8	6.22	18.81	9.17	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	6,252.19	9.14
17.50	1.8	6.60	19.95	9.72	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	7,459.24	9.69
18.50	1.8	6.97	21.09	10.28	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	8,812.42	10.25
19.50	1.8	7.35	22.23	10.83	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	10,320.10	10.80
20.50	1.8	7.73	23.37	11.39	1.23	2.75	7.07	0.33	0.97	11,990.62	11.36

二、VORTEX 无叶片风机的“黑”科技

2.1 风速千变万化，追寻“共振”不间断

传统工程设计中，共振常被视为“灾难”的预兆；但在 VORTEX 的体系中，共振却是“被利用的礼物”。关键在于，如何持续保持与风的同步共振？

这其实是 VORTEX 工程系统最精妙、也最核心的技术之一。

2.1.1 共振的基础机制：调频结构设计

VORTEX 设备的“柱体”并不是刚性固定的结构，而是一个具有柔性响应能力的非线性振动系统。它的共振频率由以下几个变量共同决定：

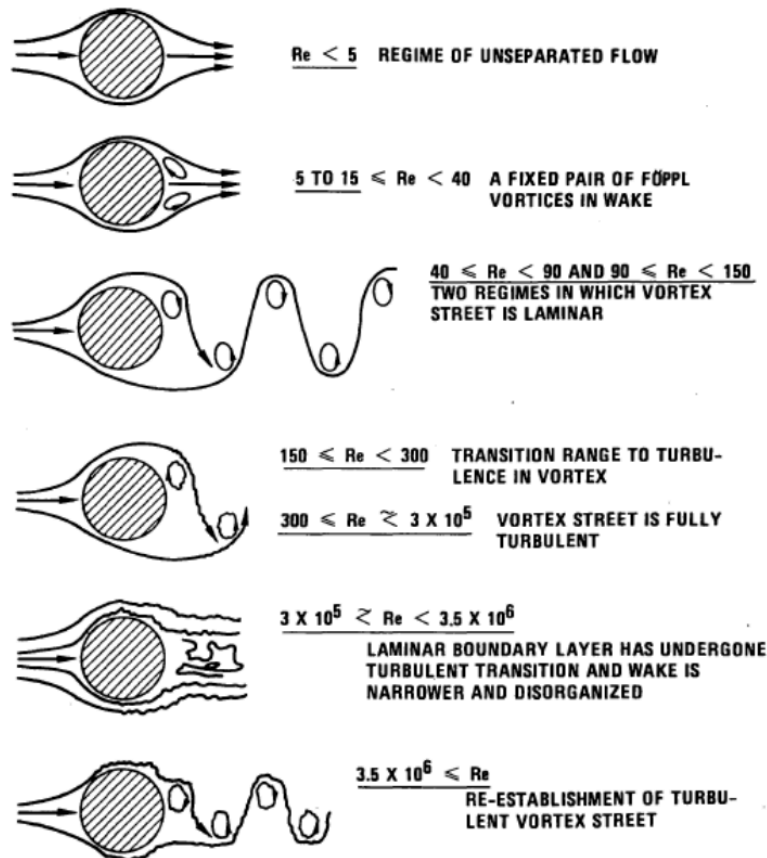
- 杆体质量和分布（越轻越容易振动）；
- 杆体的刚度与锥度设计（影响回弹速度）；
- 底部磁弹系统的阻尼与恢复力（决定是否“过冲”）；

工程团队通过数值仿真和风洞实验，将结构频率调控至与风速范围内典型涡激频率重合，实现主动共振激发。

2.1.2 自调谐能力：动态响应风速变化

真正的挑战是，风速是不稳定的。风场中的瞬时风速常常在 1~12 m/s 之间剧烈波动。（参见图四）如何让风杆始终与风“合拍”？

VORTEX 的解决方案是：引入非线性调谐结构 + 可调磁弹系统。这套机制使得风杆在面对不同风速时，自动调整自身的“工作频率”，即“哪怕风速变化，柱子依然能在合适频率范围内稳定振动”。



图四：涡激振荡的范围和共振频率示意图

工程术语称之为：自适应频率锁定（Adaptive Lock-in）。

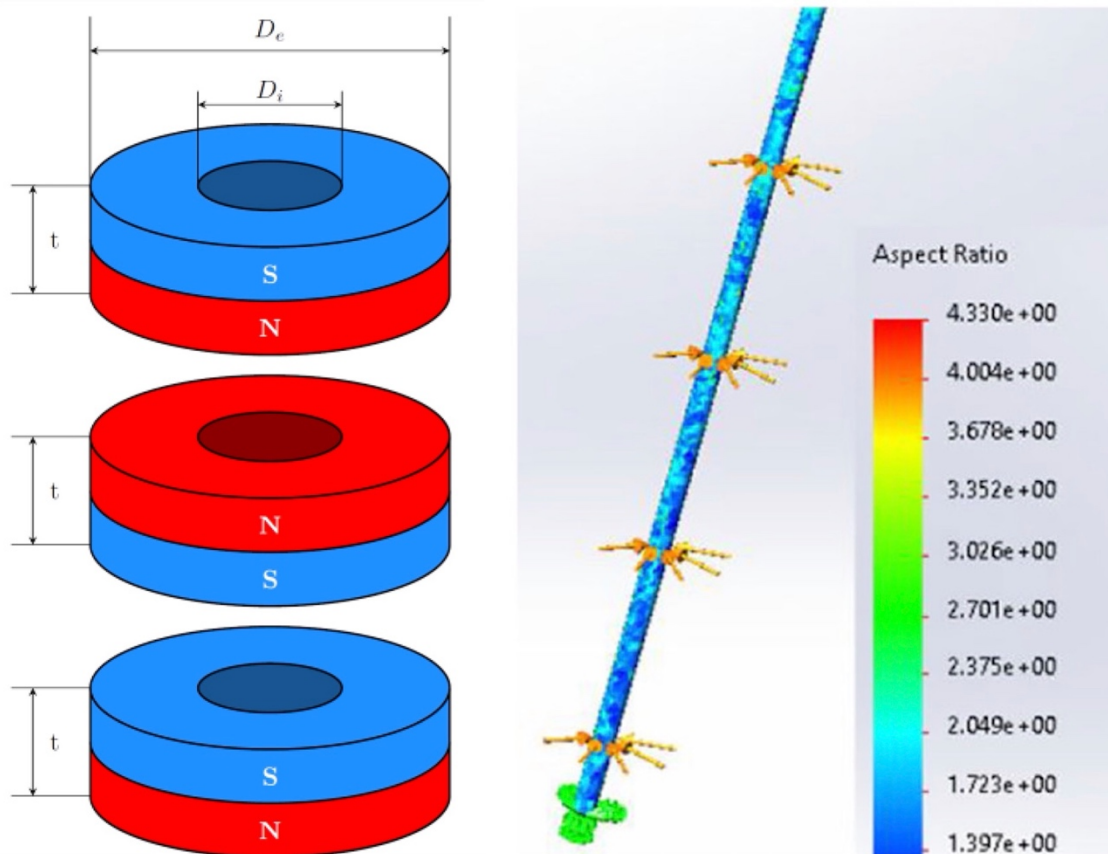
这就好比一个人在不同节奏的鼓点中，始终能找到自己的舞步节奏。

2.1.3 阻尼机制优化：扩展有效风速窗口

实现共振虽好，但若振幅过大，也会引发结构疲劳。为此，VORTEX 引入了两类阻尼机制：（参见图五）

- **磁阻尼：**通过可控磁场在高风速时吸收部分动能；
- **结构阻尼：**利用杆体内部材料自身的耗散能力抑制幅值激增；

这两种机制结合，使得风机可在 **1.5 m/s 至 25 m/s** 的风速范围内稳定输出，极大地扩展了发电时段。



图五：磁阻尼和结构阻尼示意图

而在传统风机中，启动风速往往需达 4.5~6 m/s，低风速区间基本处于“停机”状态。

2.2 振动转化为电能

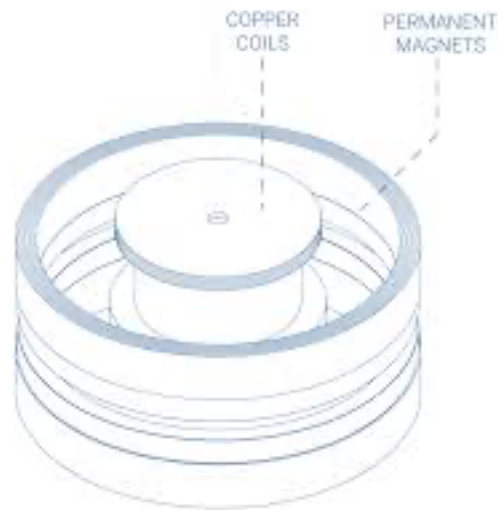
在传统风力发电机中，风叶旋转带动发电机转子，通过旋转切割磁场线圈产生感应电流。这种方式需要复杂的机械结构来维持旋转、控制转速、处理摩擦和能量损失。

而在 VORTEX 中，整个发电过程完全不需要旋转。取而代之的是一种更加简洁、高效且低维护的机制——**往复运动的电磁感应系统**。

2.2.1 电磁感应过程

VORTEX 的发电机制并不靠旋转（参见图六），而是基于往复运动的电磁感应（磁通量变化）原理，我们可以把它简化为以下几个步骤：

- **柱体振动**：风激起的涡街让杆体左右或前后微幅振动，振幅一般单边在 3.5 度左右，频率可达 3~7 Hz。
- **机械传递**：柱体通过柔性连接装置，将振动传递到底部的磁铁结构；
- **磁体运动**：这些磁体沿固定的线圈组件往复切入切出移动；
- **电磁感应**：根据法拉第定律，磁体在导体中穿行，磁通量发生变化产生电流；
- **整流调节**：输出的交流信号通过电路系统整流、稳压，变成可用的直流电。



图六：无叶片风机发电单元示意图

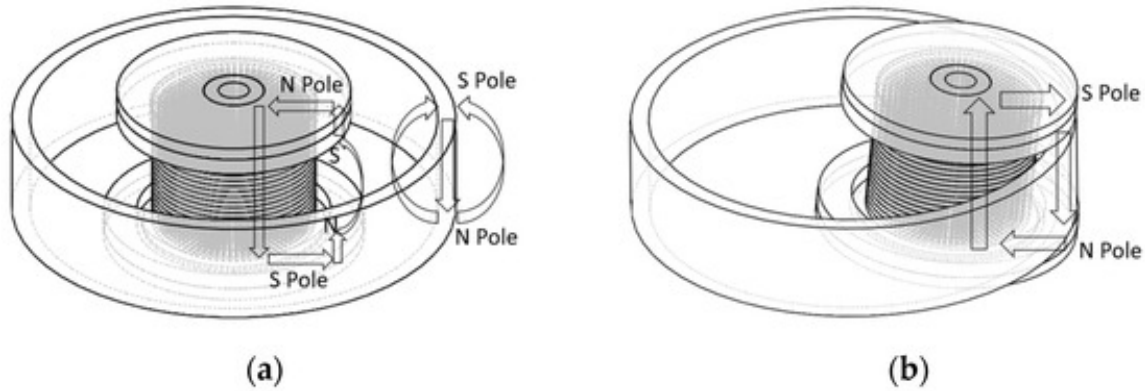
这是一种无需齿轮、无需轴承、无机械摩擦的“非接触式能量转换系统”。设备不发出尖锐声响，也不需频繁润滑或更换零件。

2.2.2 电磁感应原理，从旋转变为摇摆

我们熟知的法拉第电磁感应定律其实并没有要求必须“旋转”。只要有**导体在磁场中发生运动**，通过改变磁通量就能在导体中产生电流。

VORTEX 正是利用这一点，将“旋转切割磁力线”简化为“左右摇摆往复切割磁力线”（参见图七）：

- 在风柱振动时，其底部连接的磁钢组+磁芯会沿着一定轨道前后移动；
- 这些磁体穿梭在**固定不动的线圈绕组**中切入切出；
- 当磁体以一定速度穿过线圈区域时，磁通量会发生改变；
- 在线圈中就会感应出交流电压。



图七：电芯振子在磁钢中运动示意图

这就实现了一个非旋转、非接触、几乎无磨损的发电过程。

2.2.3 结构设计理念

核心组件包括：

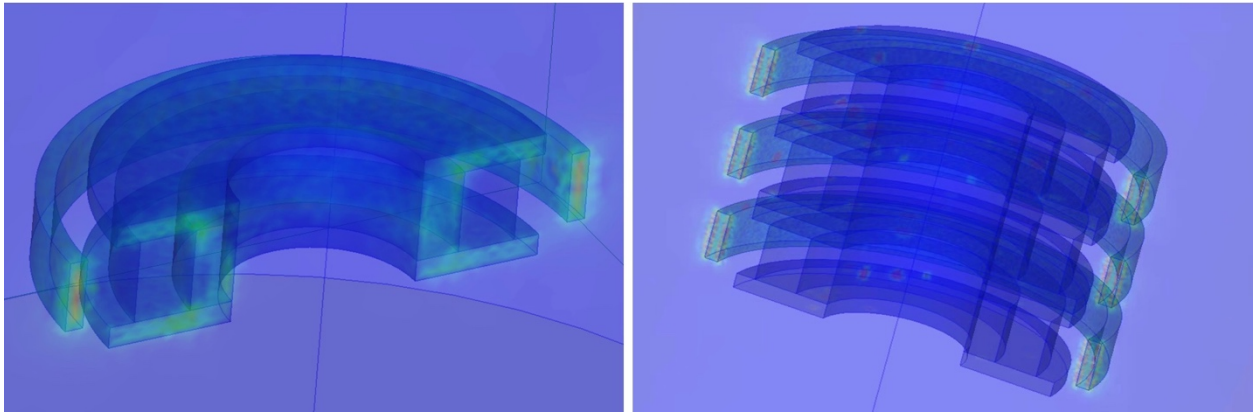
- **磁芯（振子）：**
 - 环绕于磁体运动路径两侧的铜绕组；
 - 多匝线圈设计提高电压输出效率；
 - 安装在柔性连接装置上，随着柱体振动而前后移动。
- **磁钢组（定子）：**
 - 多个高性能稀土磁体，排列成一定磁极方向的结构；
 - 安装在外侧套筒上，相对固定于整个棒体；
 - 可以使用多组磁钢组构成三级甚至四级叠加系统，实现多路电能输出。
- **支撑系统：**
 - 利用磁悬浮和弹性限位，确保磁体往复运动稳定、低噪、无撞击。

2.2.4 能量转换效率

VORTEX 的这套直线感应系统虽然单位磁体发电效率不及高速旋转系统，但它具有以下几项核心优势：

- **损耗极低：**无齿轮、无接触、无润滑、无热能浪费；
- **响应灵敏：**风来即震动，低风速即可发电；

- **冗余设计**：可通过多个磁体-线圈组的并联，实现容错和并发；
- **极端适应性强**：在沙尘、寒冷、盐雾等环境中更稳定；



图八：单层磁钢和多层磁钢发电模块的磁通量示意图

最新一代的 Atlantis Slim 版本，已引入**多层线性发电模块**（Multi-stack Linear Generators），即在一个风柱内部配置多个独立磁体-线圈组（参见图八），让一次振动产生**多路电能输出**，大幅提升单位体积的发电密度。

2.2.5 与储能系统的耦合

直线电磁系统输出的是**非稳定交变电压信号**，但可以非常容易通过：

- 整流桥；
- 滤波器；
- DC-DC 调节器；

转化为可用于锂电池储能、LED 照明或室内供暖、通信设备供电的稳定直流电。

这使得 VORTEX 无叶片风机成为理想的**分散式能源供给节点**，可独立运行、无需逆变器即可支持基础设施工作。

2.3 VORTEX 风机的“聪明”之处

在风能发电中，“效率”始终是第一原则。而效率的前提，是“共振”能否持续发生。VORTEX 风机真正的技术突破，不仅在于去掉了旋转结构，更在于它拥有一套类似“生物本能”的**自动频率调谐系统**，使其能在风速变化时始终保持“与风同步”。

这就像一个会跳舞的人，风速越快，它就跳得越快；风速变慢，它的舞步也跟着放慢。没有人干预，全靠结构自适应完成。

2.3.1 “共振”的重要性

共振，是当外部激励频率与结构自身的固有频率一致时，系统响应幅度急剧放大的现象。在 VORTEX 中，共振是理想状态，因为它能使风能最大限度地激起风杆振动，从而获得最大的机械能用于发电。

但现实中，风速是不断变化的，激励频率也会随之变化。这就像“风在变节奏跳舞”，如果设备自身不能“跟着调”，那么共振就会中断，输出大幅下降。

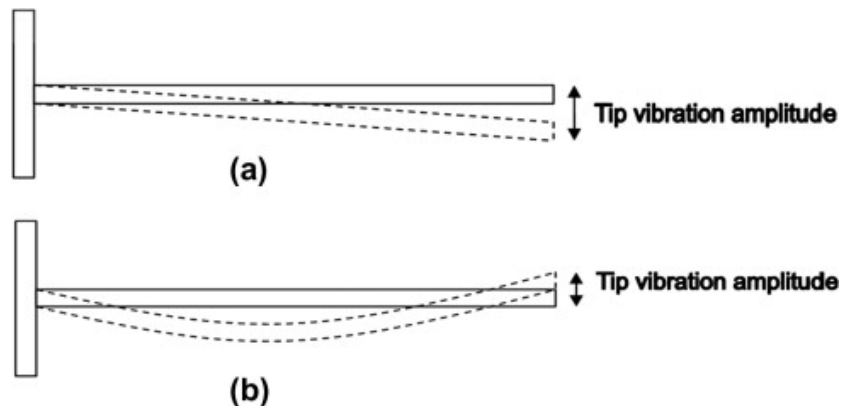
所以问题来了：怎样让风机自己“跟上风”？

2.3.2 自动调频：不是靠芯片，而是靠结构本身

VORTEX 风机的调频能力，不依赖电子系统或外部电控，而是由结构设计本身实现的“被动自适应系统”，具备以下三大核心特性：

(1) 非线性结构设计

风杆的结构并非等截面、等刚度设计，而是通过杆体韧度、材料层叠厚度、局部柔性区段形成一种“非线性弹性系统”。这使其在不同外部激励下，表现出不同的动态响应频率。（参见图九）



图九：碳纤维棒的模量测试示意图

(2) 磁弹耦合支撑系统

风杆底部并不是刚性连接，而是与一个由碳纤维组件 + 永磁体组成的柔性支撑系统连接。这个系统在不同风速下会因磁排斥力或弹力变化，动态改变系统的等效刚度，从而改变振动频率。

(3) 质量-刚度自调节结构

某些 VORTEX 结构中，还引入了**质量块偏移**或**磁性阻尼**等机制，使得系统能根据风载自动“重心调整”，进一步拓展调谐带宽。

这些设计结合在一起，使得 VORTEX 风机拥有一个**宽频带的自激发响应区域**，可以在风速变化范围内（2.5–35 m/s）*保持高幅值共振。（*：气动部件需要经过特殊处理）

2.3.3 简单打个比方

如果传统风机像一把定音鼓，只能在一个音高上最响亮，那 VORTEX 无叶片风机就像一个“自调音的弦乐器”，可以自己根据风速调弦，让每一次风来的节奏都刚好“合拍”。

这种“被动适应机制”无需外部能源、无需电子控制，完全靠**结构非线性和磁力场调节**实现，响应快、稳定性高、寿命长，是整个系统可靠性的重要保障。

2.3.4 现实意义：更稳、更省、更强适应

自动频率调谐系统的存在，让 VORTEX 不再是“风强才工作”的设备，而是一种**随风而动、因风而优的智能响应结构**。这使得它特别适合以下环境：

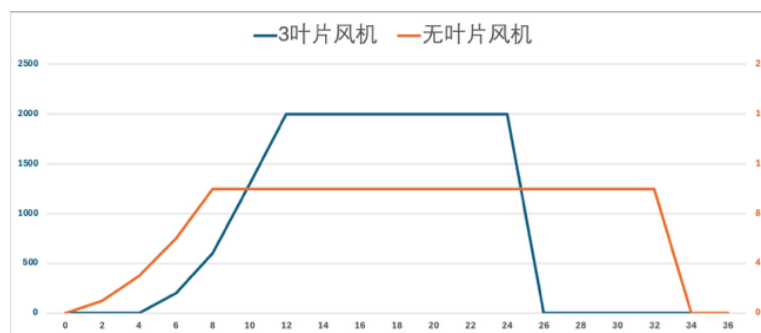
- 风速波动剧烈的城市、工业园、山区等；
- 风速较低但稳定的热带沿海、小岛屿、湖泊周边；
- 对启动速度要求低、全年运行小时数要求高的微电网场景。

三、无叶片风机的特性

3.1 无叶片风机发电小时数更高的原因

3.1.1 无叶片风机适应的风域更宽：

- 三叶片风机的切入风速一般在 4m/s 以上，切出风速约为 25m/s 以下。
- 无叶片风机在 2-30m/s*持续发电，覆盖 3 叶片停机 (>25m/s) 或低效 (<4m/s) 时段，年发电小时数提升 **20%-30%**。（参见图十）（*：气动部件需要经过特殊处理）



图十：无叶片风机和三叶片风机工作风域对比

3.1.2 无叶片风机适应风向变化快：

- 传统三叶片风机对风向变化的响应一般在 2 分钟，同时需要根据风速的变化调整叶片角度和控制转速，这都会影响有效工作时长。
- 无叶片风机无需风向调整，无叶片杆可随风向自动共振；可在小风、乱流、涡流等条件下也能发电，适合城市、园区等分散场景，保持持续运行，年发电小时数提升 **15%-25%**。

3.1.3 无叶片风机不需要检修维护：

- 传统三叶片风机部件数量多（约 **6000~8000** 个），任何一个关键部件失效都可能导致停机或脱网。
- 无叶片风杆整机部件数约 **20** 个，且全部为刚性连接；也没有变桨、刹车等控制单元，以及齿轮箱、传动轴等机械部件，减少了因部件损坏造成的停机，运行小时数比同尺寸叶片机多 **30~50%**。

3.2 无叶片风机的设计寿命

3.2.1 耐久性和稳定性：

风杆需长时间振动，既不能太软（会失稳），也不能太硬（不响应风），还需在极端温差中保持弹性。VORTEX 采用了**高强度碳纤维复合材料**，既轻又韧，还能耐高温、抗紫外。

- 无叶片风机的杆体一直振动，所以主结构必须具备**高疲劳寿命**
 - 内部的碳纤维杆和外部的套筒、裙管等支撑件都是高强度碳纤维材料
 - 无叶片风机的主要材料为碳纤维和金属，两者在室外防护良好的情况下，寿命可达 20~30 年。
- 由于无叶片风机部件少且承载形式简单，MTBF（平均无故障时间）可达传统风机的数倍。
- 结构关键点：
 - 杆体材质需防紫外、防老化（碳纤维+环氧涂层寿命可达 15 年以上）
 - 连接部位用螺栓+橡胶减振垫
 - 发电机构无齿轮箱，无机械磨损，寿命可达 25 年

避免“锁频”或“跑模”，即在高风速下出现共振失控。工程团队通过非线性分析设计出**磁悬浮+弹性封闭系统**，保证稳定输出。

此外，虽然单台设备发电量不如大型风机。但 VORTEX 设计了**模块化阵列化部署模式**，多个小单元并联、叠加，总体效率反而提升，特别适用于城市或空间有限地区。

3.2.2 寿命与更换件:

- 无叶片风机可能需要定期更换的零件主要是少数易损连接件、PCB 板和传感器，维护周期长。
 - 杆体寿命：15~20 年（碳纤维可长期耐疲劳）
 - 发电机寿命：20~25 年
 - 弹性支撑件（橡胶、聚氨酯）：7~10 年需更换一次
 - 电控部分：20 年左右

3.3 占地面积、基座抗台风能力、倒伏影响

3.3.1 占地面积:

- 单杆直径 0.4 m;
- 基座一般 4 m² (2m x 2m) ;
- 若多杆阵列布置，间距可缩至 0.5~1 倍风杆身高;
- 相比传统风机（数十米基础直径）密度，和 700 米的间隔，无叶片风机对单位土地面积的利用率可大幅提升；也可在同一区域布置更多机组，提升单位土地发电能力。

3.3.2 基座抗台风能力:

- 无叶片风机设计的地基（2×2×1.5m 钢筋混凝土，埋深 1.5m，10 吨重）;
- 抗倾覆风速计算：> 60 m/s (216 km/h)，相当于**强台风~超强台风等级**;
- 基于 VIV 效应的工作方式，设计安全风速为 42 m/s，超过此风速，风杆自动停止摆动，也不产生顺风向倾覆力矩;
- 对比 2024 年海南、广西台风期间部分传统风机倒塔事件，无叶片风杆因无大面积叶片和高重心转子（无叶片风机的重心在距底座~1/5 高度处），抗风倒伏的风险更低。

3.3.3 倒伏影响范围:

- 在正确安装的情况下，无叶片风机倒杆的风险极低;
- 但因无叶片、无高速旋转部件，即使倒伏，安全风险远小于传统叶片风机;
- 因为无叶片风机的重心非常低（距底座~1/5 高度处），若因安装失误发生部件脱落，最可能的是**头帽脱离**，重量仅 14 kg，影响范围有限;
- 即使万一顶部构件脱落，剩余风杆会因 VIV 效应自动静止，对地基无破坏。

四、无叶片风力发电技术总结

无叶片风力发电技术是一种基于涡激振荡（Vortex-Induced Vibration, VIV）效应的新型风能利用方式，通过结构与气流相互作用，将风流在背风侧形成的卡门涡街转化为振动

动能，并直接驱动磁感应发电机进行发电。与传统水平轴三叶片风机相比，该技术在结构简化、维护成本、运行安全性以及环境适应性方面具有显著优势。

- **结构极简，可靠性高**
 - 整机部件数约为传统风机的 1/200，消除了齿轮箱、偏航系统、变桨系统等复杂机械装置，显著降低故障概率和维护需求。
 - 主要材料为碳纤维与金属，耐腐蚀、疲劳寿命长，设计寿命可达 20–30 年。
- **低风速启动，高利用小时数**
 - 启动风速可低至 1.5–3 m/s，可在更多气候条件下持续发电。
 - 无需随风向调整，乱流和多向风条件下依然保持稳定输出，使年可利用小时数显著高于传统风机。
- **占地小，布局灵活**
 - 基座占地仅 2-4 平方米，安装密度高，可广泛部署于地形复杂或土地紧张区域。
 - 轻量化塔体（型号：Tacoma 3m 高）适配屋顶、工业园区、通信塔等分布式能源场景。
- **优异的抗风与安全性能**
 - 基于 VIV 工作原理，极端风速下不会形成顺风向倾覆力矩，抗风能力可达 60 m/s（17 级台风以上）。
 - 风速超过发电设计阈值时，根据 VIV 原理，无叶片风杆会自动停止震动。
 - 倒塔风险极低，即使局部构件脱落，对周边环境的影响有限。
- **全生命周期经济性优势**
 - 虽然单机瞬时能量捕获率低于三叶片机，但通过减少停机、降低运维成本、延长寿命，可在 LCOE（平准化度电成本）上获得竞争力。
 - 适合城市、园区、微电网、通信基站等对可靠性与低运维成本要求高的场景。

免责声明（Disclaimer）

1. 知识产权归属

本文件及其所述技术资料、图文内容，均为 上海沃振能源科技有限公司 独家拥有的知识产权。未经书面许可，不得以任何形式复制、传播或使用。

2. 原创性与编辑权

本文件为原创撰写，且 上海沃振能源科技有限公司 保留全部编辑与修改权利。任何对本文件的引用或改编须经我司书面授权。

3. 原始发布日期

本说明材料原始撰写日期：**2025 年 8 月 10 日**。如后续版本与本版本存在差异，以最新版为准。