

做直线运动的升力型垂直轴风力发电方法

本发明揭示一种全新的垂直轴风力发电方法（装置）。该方法（装置）的小车组在其内的高升力系数风叶推动下在可转动导向框架的上风侧直线段作直线运动，当该小车组经过位于上述框架左右两侧外的齿轮群时，小车左右两侧的直齿条群将推动上述齿轮群转动从而将小车的直线运动转化为齿轮群垂直轴的旋转运动，并通过该垂直轴传递该转动动能到框架下或地面的发电机房，最终驱动发电机产生电力。相对于现有水平轴风力机（HAWT），我们命名该发电方法（装置）为线性移动垂直轴风力机（LMWT）。

LMWT 与当前的 HAWT 相比具有多项优势：

- LMWT 的风叶在做功区可以始终保持理想的攻角。在**设计风速**范围内，它始终能以**最高效率**运行。因此，其实际电力输出将远高于现有商业化的风力发电机；
- 在风速高于设计风速的**极端大风**条件下，通过转动导向框架，LMWT 仍然可以**安全稳定满负荷**运行；
- 小车（风叶）的移动速度只有**每秒数米**，不会对附近社区产生噪音和振动问题，也基本消除伤害路过飞鸟的危险；
- 高效利用了扫风面顶端区域的**高品质风能**；同时，LMWT 单台风力机的扫风面积可大幅增加，更适合**大型和超大型**的风场；
- 发电机房的数量和位置可以灵活布置，更好地适配风场的特殊情况；
- 支撑塔的高度可以只是所需的净空高度或更短，比传统的水平轴风力发电机起码短一个完整的叶片长度；
- 没有超大型的风力机零部件，更易于制造、运输和安装。

LMWT 的潜在缺点：更多数量的捕风小车，支撑塔和其顶上的圆形支撑环。

相对于现有大型垂直轴风力发电的想法，本发明具有以下优点

- 上风侧直线段的风叶可以总是维持一个理想攻角；
- 扫风区域在高度方向上大大增加，有效利用了离地面越高风品质越优的好处；同时大大增加了扫风面积。

一. 理解风力发电机原理

1. 理解风吹过风叶时产生的升力和阻力

1-1. 风叶不动时的升力和阻力

如图 1 所示，当风叶不动而风以速度 v_w 吹过风叶时，会产生力 F_t 。该力可分解为沿风向方向的阻力 F_d 和垂直于风向方向的升力 F_l ：

$$F_l = 0.5 * \rho * S * v_w^2 * C_l$$

$$F_d = 0.5 * \rho * S * v_w^2 * C_d$$

ρ ：空气密度 Kg/m^3

S ：风叶面积 m^2

v_w ：风速 m/s

C_l ：升力系数

C_d ：阻力系数

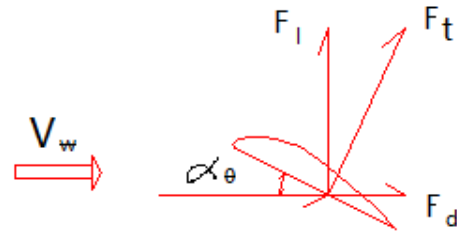


Fig 1

对于一个具体的风叶来说， C_l 和 C_d 的大小主要由攻角 α_0 和雷诺数决定。通常来说，当 α_0 从 0 到 $12 \sim 15^\circ$ 时， C_l 随 α_0 的增加而迅速增加， C_d 则缓慢增加且其绝对值接近于 0 。当 α_0 继续增加时， C_l 会首先急剧下降（称为失速现象），然后回升但之后则持续下降，当 α_0 达到 90° 时， C_l 趋近于 0 ；而 C_d 则快速增加，在 α_0 达到 90° 时 C_d 达到最大值。

利用升力作功的风力机称为升力型风力机，希望控制 $\alpha_0 < 12 \sim 15^\circ$ ，以获取最大的 C_l 同时限制 C_d 的影响。

利用阻力作功的风力机称为阻力型风力机，希望 α_0 接近 90° ，以获取最大的 C_d 同时减少 C_l 的影响。

1-2. 贝茨极限

风只能把其一部分能量传递给风力发电机，因为经过风力机做功后的风速不会为零，仅仅是减小。1927 年德国人贝茨从理论上计算出该最大值为 59.3% ，称为贝茨极限。即风力发电机的风能最大利用系数为 59.3% 。

风力发电机的风叶正对的风吹过的面积称为风力发电机的扫风面积 A ，吹过该扫风面积的风能能量 $= 0.5 * \rho * A * v_w^3$ 。在同样风速的情况下，风力发电机的输出能力直接受制于其扫风面积 A 的大小。最大输出风能为 $0.2965 * \rho * A * v_w^3$ 。

二. 风叶处于运动状态时的作功力 (F_g) 和非作功力 (F_b)

当风叶处于运动状态时，风的攻角 α 会发生显著变化。为了更好地理解风吹过风叶后产生的力如何影响风叶的运动，我们应将产生的升力 F_l 和阻力 F_d 分解为沿风叶运动方向对风叶作功的力（好力 F_g ）和垂直于风叶运动方向不对风叶作功的力（坏力 F_b ）。也就是说，正的 F_g 帮助风叶维持其运动，负的 F_g 则阻止风叶运动；而 F_b 则不对风叶运动起作用但对风力发电机结构起破坏作用。理想的风力发电机应该有最大的 F_g 和最小的 F_b 。

2-1. 阻力型风力机的 F_g 和 F_b

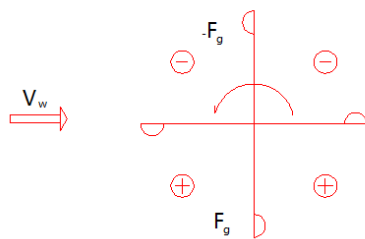


Fig 2

如图 2 所示，在上风向的 50% 的区域，阻力型风力机的风叶产生负向的 F_g 。因此，理论上最好的阻力型风力机也只能是将该区域的风产生的负向 F_g 减少到接近 0。故其风能最大利用系数不会超过 30%。由于阻力型风力机的低风能利用效率，注定其不具备大型商业化的经济基础。

2-2. 传统垂直轴升力型风力机的 F_g 和 F_b

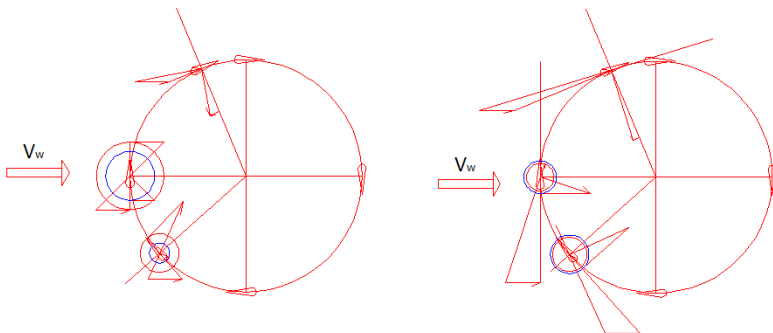


Fig 3-1

Fig 3-2

如图 3 所示，在风叶旋转一周的过程中，攻角 α 随风叶在圆周的位置和尖速比 λ (V_t/V_w) 的不同而有显著变化。

当 λ 足够大时 (Fig 3-2)，在风叶旋转一周的过程中，有可能从升力而来的 F_g 总是大于由阻力而来的 F_g (蓝色园大于黑色园)，从而为风叶的旋转提供正向的作功力。但可惜的是，在可能产生最大升力的区域

(图中顶部区域 V 达到最大值 $V_w + V_t$)，由于此区域 α 近似 0， $F_g = F_l \cdot \sin(\alpha)$ 趋近于 0 而不能得到有效利用。

而当 λ 不够大时 (Fig 3-1)，则只有部分区域从升力而来的 F_g 大于由阻力而来的 F_g ，而其余区域的从升力而来的 F_g 小于由阻力而来的 F_g (蓝色园小于红色园)，即这些区域的风叶会产生负向的 F_g 而阻止风叶旋转。

因此，总体来说，传统垂直轴升力型风力机的风能利用效率也不高；不仅如此，在可能产生最大升力的区域，其 $F_b = F_l \cdot \cos(\alpha)$ 却因为 λ 的增加而相应呈指数级增加，此外，在风叶旋转一周的过程中，由于 F_b 对风叶交替产生或推或拉的力，极大地恶化了风力机的平稳运行条件，这可能是传统垂直轴升力型风力机未能实现大型商业化的另外一个重要原因。

2-3. 传统水平轴风力机的 F_g 和 F_b

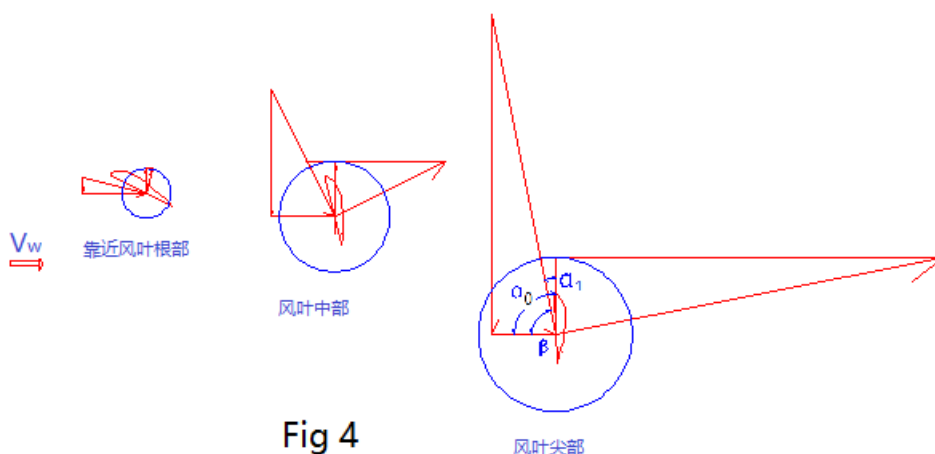


Fig 4

如图 4 所示, 沿半径方向, 随着 R 的增加, V_t 也增加, 导致 λ (V_t/V_w) 增加, β 角增加而真实攻角 $\alpha_1 = \alpha_0 - \beta$ 则减少。

$$F_g = F_l \cdot \cos(\beta) - F_d \cdot \sin(\beta)$$

$$F_b = F_l \cdot \sin(\beta) + F_d \cdot \cos(\beta)$$

因此为保证有一个大于 0 的 α_1 , 随着 R 的增加, 风叶面对来风的 α_0 必须相应增加。通过做相应的风叶扭曲可以使整个风叶都有一个大于 0 的 α_1 , 因此整个的风叶均可产生正向作功力 F_g 。一方面, R 增加, V_t^2 大大增加, 导致 F_l 大大增加, 但 β 也增加, $\cos(\beta)$ 减少, 最终 F_g 会适量增加; 另一方面, 随着风叶长度越来越大, 风速 V_w 在扫风区域的最低点和最高点的差距也相应扩大, 这为希望在旋转一周的过程中都有一个理想的 α_1 带来了更大的挑战。而如果没有一个理想的 α_1 , 风力机的效率也就会相应降低。

与此同时, 在风叶尖部, 不仅 F_l 大大增加, $\sin(\beta)$ 也增加, 故 F_b 更是大大增加, 这对风叶向更大型方向发展带来了巨大的挑战。因为不仅风叶的制作愈加困难 (整体强度要求大大增加), 巨大的 F_b 使风叶可能产生的变形 (增大叶尖打到支撑塔的可能性) 也严重影响传统水平轴风力机的安全运行。这也是传统水平轴风力机进一步增大变得越来越困难的一个主要原因。

三. 本发明的 LMWT 是一种特殊的升力型垂直轴风力机

3-1 LMWT 的 F_g 和 F_b 分析

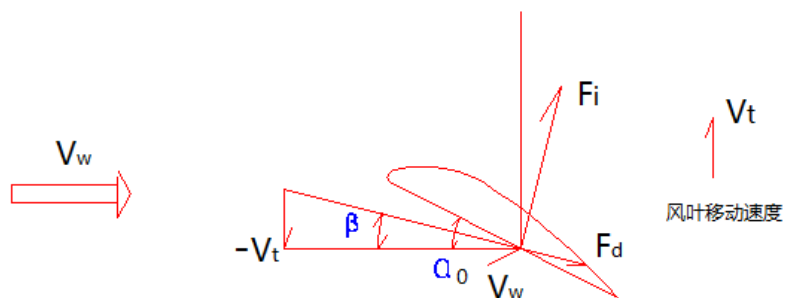


Fig 5

如图 5 所示，如果风叶不做圆周运动而沿直线运动，则其真实攻角 $\alpha_1 = \alpha_0 - \beta$ ， β 随 V_t/V_w (λ) 的增加而增加。

$$F_g = F_l \cos(\beta) - F_d \sin(\beta)$$

$$F_b = F_l \sin(\beta) + F_d \cos(\beta)$$

在风叶沿直线运动的过程中， α_0 和 β 可保持不变，因此其真实攻角 α_1 也可以不变。

当 $\lambda = 50\%$ ， $a = 26.57^\circ$ ，如果控制 $b < 38.5^\circ$ 和忽略 F_d 的影响，则可以得到在整个的直线运动过程中， F_g 近似等于 $0.89F_l$ ，而 F_b 近似等于 $0.45F_l$ 。



Fig 6

更进一步，如果我们设法使风叶沿升力方向做直线运动，如图 6 所示，则在整个的直线运动过程中 $F_g = F_l$ ， $F_b = F_d$ 。也就是说，如果我们控制攻角在理想区域 (α_1 在 12° 左右)，我们就可实现 C_l 在最大范围的同时使 C_d 接近于零，即最大化 F_g 的同时最小化 F_b 。

需要指出的是，对图 5 所示的方法来说，其升力 F_g 将大于初始升力 F_{g0} ，且合成风速和升力 F_g 随着 V_t 的增加而增加，因此其 V_t 会不断增加一直到其 F_b 产生的额外摩擦力等于新增的 F_l 时， V_t 就达到最大值；

对图 6 所示的方法来说，其升力 F_g 将小于初始升力 F_{g0} ，且合成风速和 F_l 皆随着 V_t 的增加而减少。因此当 F_l 不断下降一直到其无法使风叶移动更快时， V_t 就达到最大值；

λ	Fg in Fig 5	Fg in Fig 6
0.1	101% F_{g0}	99% F_{g0}
0.2	104% F_{g0}	96% F_{g0}
0.3	109% F_{g0}	91% F_{g0}
0.4	116% F_{g0}	84% F_{g0}
0.5	125% F_{g0}	75% F_{g0}
0.6	136% F_{g0}	64% F_{g0}

由此可见，图 5 所示的方法会产生更大的作功力，但同时也会产生一个较大的横向的破坏力；图 6 所示的方法虽然会牺牲一些作功力，但同时也限制了产生横向的破坏力。因此，从工程实践的角度来说，当 λ 较小时，图 5 所示的方法可能更好；当 λ 较大时，图 6 所示的方法可能是更佳的选择。另外，图 5 所示的方法较难实现而图 6 所示的方法则容易实现。

此外，显而易见的是，在实践上风叶是不可能一直做直线运动的，必须是一个循环的过程。本发明的 LMWT 的循环过程由上风侧的直线段，下风侧的直线段和连接这两个直线段的两个半圆转向段构成。还需要指出的是，风叶在从上风侧后的转向段转动 180° 后，如果风叶保持不动的话，则该风叶在下风侧直线段将产生负向的 F_g ，虽然因为风速的减少和较差的风向稳定性，该负向的 F_g 较小，但它仍会降低风力机的整体效率。因此，当风叶在从上风侧直线段转到下风侧的直线段后，风叶最好能转动一个角度以便在下风侧直线段的风叶也可产生少量的正向的 F_g （辅助升力）使小车顺利回到上风侧直线段。但**我们的目的是最大限度地有效利用上风侧的风能**，因此在下风侧直线段松开风叶使其自由随风转动，不产生阻力(负向的 F_g)或只产生很小的阻力也是可以接受的。但在从下风侧直线段转到上风侧的直线段时，小车上的风叶必须回到初始的理想攻角。

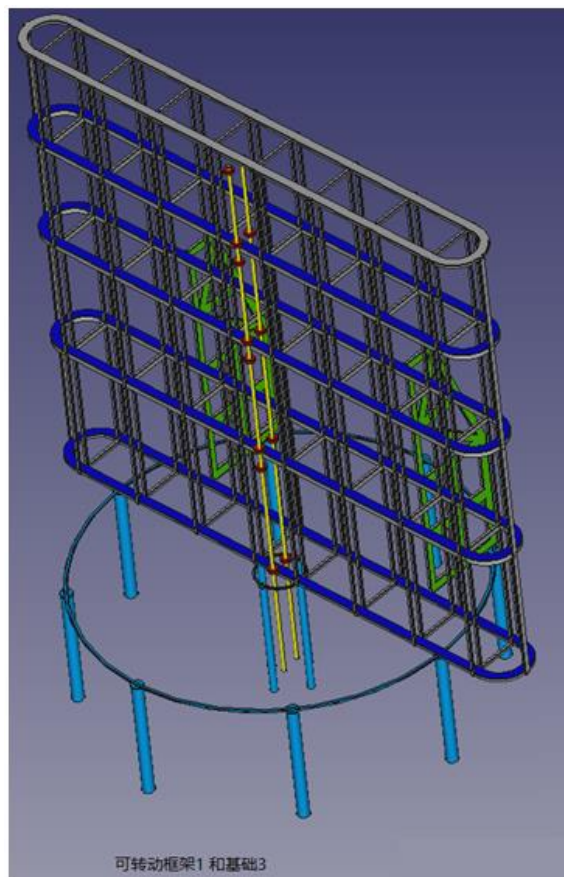
3-2. LMWT 的具体实施

本发明由三大部分构成：

可转动导向框架：可由多层框架叠加而成，根据风向和其内运行小车组的速度做相应转动，并为该小车组提供必要的导向，限位装置以确保小车组在该导向框架内正常和安全运行。同时，其中心或上风侧直线段末端两侧外的齿轮负责将小车组的直线运动转变成齿轮的垂直轴的旋转运动。导向框架底部还可以加一个帮助其稳定的结构；其底部还有转向齿轮使整个导向框架可以在下面的圆形轨道旋转。

在上述导向框架内运行的小车组：由多个承载风叶的坚固细长小车组成。风叶在垂直方向安装在小车上，其作用是小车在风叶产生的水平推力的作用下，在上述导向框架内做一个循环的运动，即上风侧直线段，半圆转向段，下风侧直线段，半圆转向段，回到上风侧直线段。在通过框架两侧外的齿轮时，小车外框两侧直齿条推动与之咬合的上述的齿轮和联结该齿轮的垂直轴转动。

支撑上述导向框架的基础塔群：由中心的主塔和外围沿圆周分布的支撑柱和其顶上的圆形轨道组成。其中心主塔或任意圆形轨道的还有配合导向框架转向齿轮的圆齿条。



3-2-1 可转动导向框架

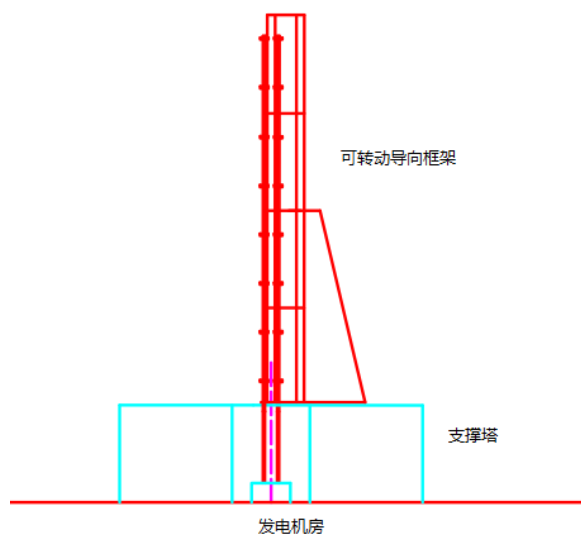


图 7

如图 7 所示的红色部分，该导向框架的大小将稍大于风力机的扫风面积，由多层框架叠加而成。各层框架的长度，宽度相同。每层框架呈细长型，由两个直线段和两个半圆段构成一个闭合环路，而且上风侧直线段（工作段）的中心和上述支撑基础塔群（图 7 的黑色部分）顶上圆形轨道的中心吻合。该中心或上风侧直线段末端两侧外设有齿轮组和传递该齿轮组旋转动能至下面发电机房的垂直轴。当上述小车组在风叶产生的升力（水平推力）驱动下在本框架内通过上述齿轮时，小车组两侧的直齿条组将推动与之咬合的齿轮组转动从而将小车组的直线运动转变成上述齿轮组垂直轴的旋转运动，并最终驱动位于下面的发电机发出电力。

该导向框架的底部还可以增加一个没有小车通行的稳定框架结构，其作用是确保上述导向框架的绝对稳定。通过位于底部的多组轴承组，导向框架坐落在上述支撑基础塔群顶上的圆形轨道上。该框架上可设置多个转向齿轮，根据风向，风速和小车的运动速度，通过安装在该圆形轨道上的齿轮轨道的导引作相应的转动从而使整体框架转动至需要的位置，从而使固定在小车上的风叶在上风侧直线段（工作段）保持一个设计的攻角并使框架内小车组在上风侧直线段（工作段）沿设计（通常是升力）的方向前进。

每层框架还设有相应的导向，限位装置以满足小车运行在不同框架位置可能产生的不同需求，例如小车间的联结/断开；风叶的锁定/松开以及引导风叶转向的导轨。

3-2-2 在上述导向框架内运行的小车组

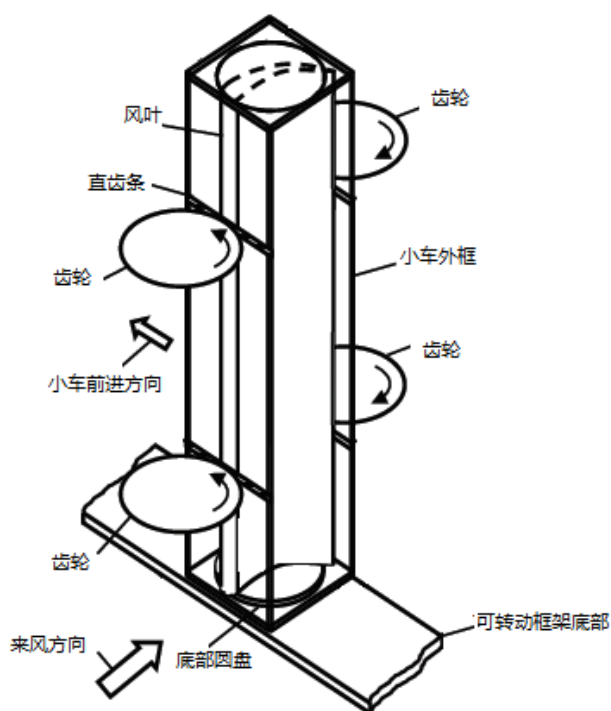


Fig 8 做直线运动的小车

小车组由多个独立的小车组成。如图 8 所示，小车呈（长）方形，外框是一个坚固的中空结构，中间的风叶安装在顶部和底部之间的圆盘上，并随圆盘的转动而转动，该风叶应该选用非对称的有高升力系数的风叶。该小车左右两侧设有直齿条，底部设有滚动轴承（车轮），底部，中部和顶部还设有限位和导向的滚动轴承（车轮）；另有联结/断开相邻小车的装置和锁定/松开以及引导风叶转向圆盘的装置。

当风吹过上风侧直线段小车内的风叶时，风叶产生的升力（水平推力）推动小车沿升力方向在上述导向框架内做直线运动，如果发电机房设置在中心，此时小车与其它小车联结在一起，这不仅确保了所有风叶产生的升力都被有效利用，同时相互联结在一起的小车组成的小车组大大增强了整体刚性，可以承受这些升力的合力给与小车框架的巨大压力。

如果发电机房设置在上风侧直段末端，则小车与其它小车自然就联结在一起，无需特别的联结装置。

当小车通过中心或末端时，小车两侧的直齿条就推动上述导向框架两侧的齿轮组转动，将小车的直线运动转变成了垂直轴的旋转运动并最终带动位于下面的发电机发电。

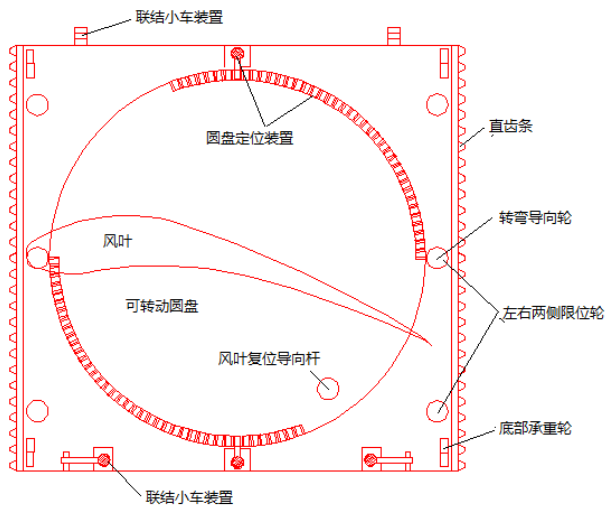


Fig 8-1 小车俯视图

当该小车运行至上风侧直线段末端时，该小车将与相邻的小车解除联结并单独进入转向半圆转向区。在上述导向框架半圆区的两侧转向导轨帮助下，小车将转向 180 度进入下风侧直线段。同时，在转向区的适当位置松开固定风叶的圆盘，使风叶可自由随风转动。当小车进入下风侧直线段后，部分或全部小车在位于上述框架的顶部导轨的引导下，形成这样一个真实攻角（在该攻角可产生正向的 F_g ）并在锁定后以此姿态运行至下风侧直线段末端。如果无需在下风侧直线段产生额外的正向的 F_g ，则圆盘可一直保持与小车松开状态。

同样地，当该小车运行至下风侧直线段末端时，该小车将与相邻的小车解除联结并单独进入半圆转向区。在上述导向框架半圆区的两侧转向导轨帮助下，小车将转向 180 度进入上风侧直线段。此时固定风叶的圆盘被松开，因此风叶可自由随风转动。当小车进入上风侧直线段后，全部小车在位于框架的顶部导轨的引导下，所有的风叶会回转至同一个理想角度并被锁定从而在整个上风侧直线段运行过程中，保持这个角度不变。

当该小车在工作段（上风侧直线段）运行时，风叶相对于小车是不动的，因此通过转动上述导向框架，即可使小车组沿设计（升力）的方向直线前进。

对 LMWT 来说，当实际运行风速小于设计风速时，只要使小车沿升力方向前进，风叶在工作段即可获得一个理想的攻角，因此在小车的安全运行速度内本发明的风力机均可轻易实现高效运行。另一方面，当实际运行风速超过设计风速时，只需调节导向框架确保小车运行速度在安全极限速度范围内，系统甚至可在维持安全运行的同时输出超过额定功率的电力。只有在风速过高且风向不稳定时，可启用上风侧直线段和第一个转向段的紧急安全装置松开风叶使风叶可以随风自由转动从而确保风力机在极端大风条件下的安全。

预计小车组的运行速度只有风速的 10% 到 60% 即每秒数米，本发明的风力机不会产生现有水平轴风力机的噪音问题和伤害路过鸟类的问题。

3-2-3 支撑上述导向框架的基础塔群

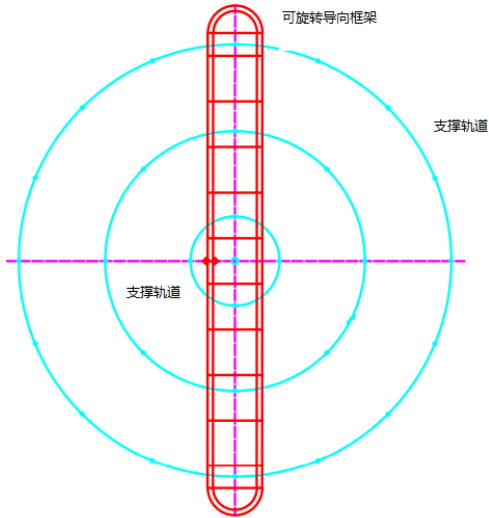


图 9

如图 9 所示，该支撑基础塔群由一个中心主塔，多个外围的沿圆周布置的支撑柱和其上的圆形轨道组成，其主要作用是确保其上的导向框架在其轨道上平稳地转动同时为小机组的风叶创造一个较理想的风能环境（更快的风速和稳定的风向）。

中心主塔除了分担整个风力机的重力之外还主要承担风叶生产的 F_g 对主塔的推力。该推力虽然巨大但其方向与导向框架的长边吻合，不会对导向框架的稳定造成大的不良影响。相对来说 F_b 要小很多，对导向框架的稳定也是一个优良条件。

外围的沿圆周布置的多个支撑柱主要承担风力机的重力。对于特大型的风力机来说，甚至需要设置多层的支撑圆形轨道，自然也就需要设置多层的相应的支撑柱。

需要指出的是，在创造相同的风能环境前提下，该支撑塔群的高度只是传统水平轴风力机的净空高度，比传统水平轴风力机少整整一个风叶的长度。

结语，上述发明的实施，将大大提高风力发电机的经济性和安全性，为寻找可再生清洁能源和阻止全球气候变暖带来了新的希望。