

水平轴风力发电机气动分析

林 瑞 麟

(精密机械工程系)

摘要 本文对水平轴式风力发电机进行气动力分析,为风力发电机可靠性设计,以及在风速变化情况下进行转速调整提供了依据。

关键词 风力发电机,气动力,升力,阻力,俯仰力矩,惯性矩

0 前言

风力机依据驱动力的方法不同,可分为阻力型和升力型,依照转轴平行或垂直于风向的结构特点分为水平轴式和垂轴式。本文只讨论水平轴风力机的气动力问题,并假设流体为定常流,流向垂直于风轮回转向。

1 作用于风轮翼叶上的气动力

在翼叶上 r 处,取 dr 段的翼叶截面(图1),其位置角 α 为安装角, i 为攻角, c 为相对风向角, z'' 为翼叶俯仰轴。翼叶上翼面拱起较大,下翼面弯度小,围绕翼叶的气流流动为两种流线的组合:(1)均匀流场中围绕翼叶的零升力流动;(2)空气环绕翼叶表面的流动。按库塔-儒可夫斯基升力定理,翼叶上部两种流向相同,流速提高,下部的流速与环量方向相反,合成后速度降低,因此翼叶上部压强降低,下部压强增高。

设 V 为气体通过风轮的轴向流速, W 为吹过翼叶 r 处表面的相对风速, U 为风轮 r 处的回转向圆周速度。因此气流相对于翼叶表面的速度为 $W = V - U$ 。当相对速度 W 流经翼叶 r 处 dr 叶

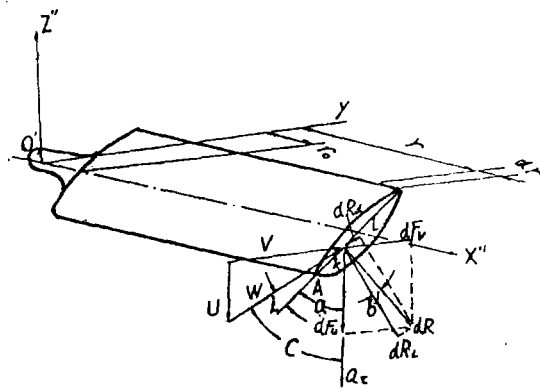


图1 翼叶位置角

本文1990-05-09收到。

素表面时,由于翼叶剖面上下表面形成的压强差,产生一气动升力 dR 作用于叶素上. dR 在 W 的垂直及平行方向的分量,称为升力 dR_L 和阻力 dR_d ,其大小

$$dR_L = \frac{1}{2} \rho C_L W^2 L dr, \quad dR_d = \frac{1}{2} \rho C_d W^2 L dr,$$

阻力 dR_d 包含:(1)气流流经翼叶表面时产生的摩擦阻力;(2)翼叶前后端形成的压强差所产生的压差阻力,其与物体的迎风面积、形状等有关;(3)翼叶在气流作用下得到一升力的同时作用于气流一反向力,使气流向下转折,形成一下洗速度,在风轮的有限翼尖处产生旋涡成为诱导阻力.

作用于叶素 dr 合力为

$$dR = \frac{1}{2} \rho C_r L W^2 dr = \frac{dR_L}{\cos b} = \frac{1}{2} \rho C_L \frac{W^2}{\cos b} L dr,$$

式中, C_d 为阻力系数; C_L 为升力系数; C_r 为总的气动系数, $C_r^2 = C_d^2 + C_L^2$; L 为翼叶 r 处的叶素弦长; ρ 为气流密度; b 为 dR_L 与 dR 之间的夹角. 若将合力 dR 投影到风轮转轴和圆周速度方位上,得到轴向分量及切向分量

$$dF_v = dR_L \cos c + dR_d \sin c = (1/2) \rho L W^2 (C_L \cos c + C_d \sin c) dr,$$

$$dF_u = dR_L \sin c - dR_d \cos c = (1/2) \rho L W^2 (C_L \sin c - C_d \cos c) dr.$$

引进关系式 $\tan b = C_d/C_L$, 则上述方程式可写成

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho L W^2 C_L \frac{\cos(c-b)}{\cos b} dr,$$

$$dF_u = \frac{1}{2} \rho L W^2 C_L \frac{\sin(c-b)}{\cos b} dr.$$

设 n 为叶片数, 于是风轮 $r, (r+dr)$ 段叶片的轴向推力

$$dF = n dF_v = \frac{1}{2} \rho n L W^2 C_L \frac{\cos(c-b)}{\cos b} dr, \quad (1)$$

驱动叶片的转动力矩

$$dM = r n dF_u = \frac{1}{2} \rho n L r W^2 C_L \frac{\sin(c-b)}{\cos b} dr,$$

$$M = \frac{\rho}{2} \int_{r_0}^R r n L W^2 C_L \frac{\sin(c-b)}{\cos b} dr, \quad (2)$$

式中, R 为翼叶长度; r_0 为翼叶柄长. 根据空气动力学, 风的动能为 $E = (1/2) \rho S V_1^3$, 式中, S 为风轮回转面积; V_1 为风轮前一段距离的风速. 设 ω 为风轮的角速度, 风能利用系数的值为

$$C_p = \frac{M \omega}{E} = \int_{r_0}^R \frac{r n L W^2 C_L \sin(c-b)}{\pi R^2 V_1^3 \cos b} dr. \quad (3)$$

为确定升力系数 C_L , 现研究由叶素 dr 回转扫出的圆环面积气动流体的轴向动量方程. 设单位质量流量 m 穿过环形面时产生的推力

$$dF = m(V_1 - V_2),$$

$$m = 2\pi r \rho V dr = \pi r \rho V_1 (1 + K) dr,$$

式中, $K = V_1/V_2$; $V = (V_1 + V_2)/2 = [(1+K)/2]V_1$; V 为气体通过风轮时的轴向流速; V_2 为离开风轮后一段距离的风速. 于是

$$dF = \pi r \rho V_1 (1 + K) (V_1 - V_2) dr, \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)得

$$\pi r \rho V_1 (1 + K) (V_1 - V_2) dr = \frac{1}{2} \rho \pi L W^2 C_L \frac{\cos(c-b)}{\cos b} dr,$$

由关系式 $\sin c = V/W$; $V_1/W^2 = 4 \sin^2 c / (1+k)^2$ 可得升力系数

$$C_L = \frac{2\pi r (1-k) \cos b \sin^2 c}{\pi L (1+k) \cos(c-b)}. \quad (5)$$

由於角度 $c = a + i$, 因此升力系数 C_L 是攻角 i 的函数, 攻角 i 改变, 翼叶上下面的压强分布跟着改变, 翼叶上的升力和阻力也跟着改变. 当 i 为零时, 翼叶上无环量绕流, 升力为零. 在大攻角情况下, 当攻角超过某个数值, 流经翼叶上表面处的流线弯曲过大, 形成较大的压力坡, 流线被破坏, 气流从翼叶前缘就开始分离, 尾部有很大的涡流区, 破坏了上表面的低压区, 升力突然下降, 阻力迅速增加, 造成“失速”现象. 据最佳攻角位置时的埃菲尔切线, 可得风力机翼叶的最佳攻角 i 约为 4° , 临界攻角 $15^\circ - 16^\circ$.

最佳攻角时, 升力 dR_L 与阻力 dR_d 大小之比

$$\operatorname{ctg} b = \frac{dR_L}{dR_d} = 50 - 70,$$

以此对应于翼叶 r 处 dr 叶素的旋转线速度 ωr , 与进入风轮前的风速 V_1 之比

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_1} = 5 - 6,$$

式中, λ 为尖速比. 功率输出达最大值时, 气体通过风轮时的轴向流

$$V = \frac{2}{3} V_1,$$

此时相对风向角 c (则翼叶的倾斜角)

$$\operatorname{ctg} c = \frac{\omega r}{V} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega r}{V_1} = \frac{3}{2} \lambda,$$

c 角的大小为 $6.23^\circ - 7.59^\circ$.

2 翼叶气动俯仰力矩

设作用于叶素上气动力合力 dR 的作用点在 k 位置 (据试验测得 $AK = (0.25 - 0.30)AB$, [7]), 取 K 在剖面上的坐标参数 y_0, z_0 . 由合力 dR 的轴向分量 dF_v 及切向分量 dF_u 的作用, 产生翼叶的俯仰力矩

$$dM_x = dF_v \cdot z_0 - dF_u \cdot y_0,$$

$$M_x = \frac{\rho}{2} \int_0^R W^2 L [(C_L \cos c + C_d \sin c) z_0 - (C_d \cos c - C_L \sin c) y_0] dr. \quad (6)$$

翼叶在气动力俯仰力矩 M_x 及后面分析指出的切向惯性力对俯仰轴 X'' 的力矩 M_{ax} 作用下将产生扭转变形, 倘若翼叶的 O' 端可以转动, 在上述两力矩作用下, 翼叶的安装角 a 、攻角 i 便会发生变化, 翼叶的气动性能、驱动转动力矩也随之改变. 因此, 我们可以利用反映风速变化的惯性俯仰力矩 M_{ox} 与气动俯仰力矩 M_x 的协同作用, 调整翼叶的俯仰角, 从而达到稳定风轮的转速.

3 风轮的偏转力矩

设风轮水平轴与跟风竖立旋转轴偏置一距离 e (图2), 在轴向推力 dF_v 作用下风轮产生偏转. 因翼叶上轴向推力 dF_v 分布不均匀, 不能简单地认为轴向推力作用于风轮的中心. 设想轴向推力为作用于风轮回转面上的正压力, 压力分布在叶尖最大, 中心处为零, 同时随着风轮偏转, 压力大小也不同. 取推力系数 C_r , 反映风轮偏角改变时, 风轮压力的大小. 因此作用于风轮的压力为

$$F_x = (1/2)C_r S \rho v^2.$$

据 K. H. Hohenemser 的试验资料, 推力系数 C_r 与风轮偏转角的关系如表1.

表1 推力系数 C_r 值与偏角

C_r	风 轮 偏 转 角 ($^\circ$)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
多叶	0.625	0.610	0.575	0.510	0.374	0.250	0.150	0.078	0.060	—
2—3叶	0.32	0.31	0.28	0.26	0.23	0.20	0.15	0.10	0.05	—

气流通过竖立转轴的分界线 $N-N$ 左部正压力 F_{x1} 使风轮回位, 右侧正压力 F_{x2} 使风轮偏离. 两力矩之差为偏转力矩 M_p .

由图2几何关系可得

$$t = e + l_1 \tan \beta, \quad B = 2 \sqrt{R^2 - t^2},$$

$$Q = 2 \cos^{-1} \frac{t}{R}, \quad S_1 = \frac{\pi R^2 Q}{360} - \frac{tB}{2},$$

$$S_2 = \pi R^2 - S_1.$$

在水平面上风轮左侧面积 S_1 压力

图2 风轮偏转

中心位置为 c_1 , 右侧面积 S_2 的压力中心位置为 c_2 , 则偏转力矩

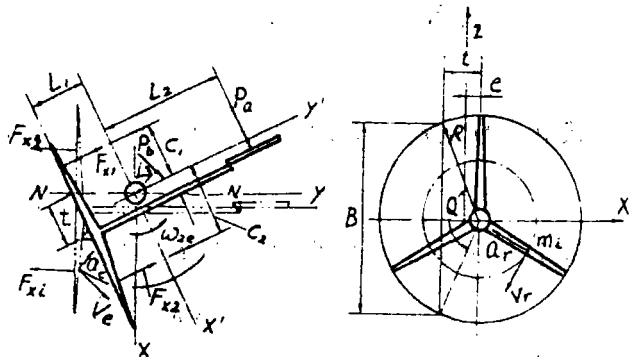
$$\begin{aligned} M_p &= F_{x2} \cdot C_2 - F_{x1} \cdot C_1 = C_1 \rho (S_2 C_2 - S_1 C_1) (V_z/2) \\ &= C_r \rho (V_z/2) [C_2 \pi R^2 - S_1 (C_2 + C_1)] \\ &= C_r \rho (V_z/2) [C_2 \pi R^2 (1 - \frac{Q}{360}) + C_1 \frac{tB}{2}]. \end{aligned} \quad (7)$$

利用风轮的自动偏转在强风时减少受风面积, 有效地限制风轮的转速. 求偏心距的大小, 可在 $t=0$ 时额定风速及极限风速条件下, 分别使偏转力矩与尾翼回位力矩、回位弹簧力矩及哥氏力矩相平衡. 压力中心位置 C_1, C_2 , 只要知道风轮面上的风压分布, 及风轮的偏转角, 便可求取.

4 回位力矩

4.1 尾翼风压回位力矩 M_r

设尾翼面积为 T , 压力中心至转轴距离 l_2 (图2), 一般取 $T = (0.04-0.1)S, l_2 = (0.6-$



1. 0) D , D 为风轮直径, S 为风轮扫风面积. 作用于尾翼上的力为 $P_s = (1/2)C_s \rho T V^2$, 式中, C_s 为矩形板的阻力系数, 长宽比在 1:4 范围内, 风向与尾翼交角为零时 $C_s = 0$, 交角 90° 时 $C_s = 1.1$. 尾翼的回位力矩为

$$M_p = P_s l_2 = (1/2)C_s \rho T l_2 V^2. \quad (8)$$

4.2 弹簧回位力矩 M_L

设弹簧刚度系数为 K , 变形量 ΔL , 弹簧恢复力 P_s 至回转轴距离 l_3 , 则弹簧回位力矩为

$$M_L = K \cdot \Delta L \cdot l_3. \quad (9)$$

5 惯性力

5.1 离心惯性力

翼叶在驱动力矩 M 作用下, 以角速度 ω 回转时, 叶素 dr 的离心惯性力为

$$dG_i = m_i \omega^2 r dr,$$

式中, m_i 为叶素质量. 翼叶的离心惯性力为

$$G = \int_0^R m_i \omega^2 r dr. \quad (10)$$

作用于风轮转轴 Y 的惯性力矩为

$$M_{oy} = -J_y e \quad (11)$$

式中, J_y 为翼叶对 Y 轴的转动惯量; e 为翼叶的角加速度. 设叶素的质心不在翼叶俯仰轴 X'' 上, 距轴 X'' 为 l , 因切向惯性力为

$$dG_i' = m_i r e dr,$$

对俯仰轴 X'' 的力矩为

$$dM_{ox''} = dG_i' l \sin \alpha = m_i r e l \sin \alpha dr. \quad (12)$$

该俯仰惯性力矩使翼叶绕轴 X'' 转动, 改变翼叶的攻角大小, 影响风轮的气动特性. 风轮转动惯性力矩 M_{oy} 对翼叶强度的影响较大, 当风速度化达一定程度会使翼叶折断. 这里牵涉到气动弹性稳定性问题, 另文讨论.

5.2 风轮偏头回转时的哥氏力

取风力机定参考系 $OXYZ$, 动参考系 $O'X'Y'Z'$ 如图 2, 动参考系随风力机偏头同步回转, 翼叶在气动力作用下, 相对于定参考系的旋转运动, 及跟风偏转(牵连运动), 存在哥氏加速度. 设翼叶上 r 处 dr 相对于 Y 轴的切向速度为 V , 风轮跟风绕 Z 轴偏转的角速度为 ω_e , 叶素 dr 的哥氏加速度为

$$\alpha_{ki} = 2\omega_e V \sin \varnothing,$$

式中, \varnothing 为矢量 ω_e 与 V 之间的夹角. 对应的作用力为

$$F_{ki} = m_i \alpha_{ki} = 2m_i \omega_e V \sin \varnothing, \quad (13)$$

这就是翼叶偏转运动而附加产生作用于叶素上的哥氏力 F_{ki} , 翼叶上不同位置叶素的哥氏力大小不同, 但方向一致, 它们对 OX 轴的力矩之和用 M_k 表示, 称为哥氏力矩

$$M_K = \omega_r \times H, \quad (14)$$

式中, H 为翼叶的动量矩矢量, 方向与风轮角速度 ω 同方向, 其大小为 $H = J_Y \omega$, 其中 J_Y 为翼叶对 OY 轴(旋转轴)的转动惯量. 所以哥氏力矩的大小为

$$M_K = \omega_r H \sin \alpha = J_Y \omega \omega_r \sin \alpha, \quad (15)$$

式中, α 为偏转角速度矢量 ω_r 与动量矩矢量 H 夹角, $\alpha = 90^\circ$.

翼叶在哥氏力矩作用下, 具有绕 OX' 轴转动的趋势, 使旋转轴产生纵向弯曲变形.

6 结论

1) 一定外径 D 的风轮, 在定风速 V 之下, 要提高风力机的输出功率, 则要增加切向分力 F_θ 的大小. 为此, 应选择翼叶的最佳攻角, 及适当提高升力 dR_L 与阻力 dR_d 的比例, 从而确定合理的翼叶截面积形状. 但升阻比过高, 叶片形状复杂, 制造困难.

2) 风力机设计中, 除考虑气动力的影响外, 应特别重视惯性力及哥氏力的作用. 为提高风力机使用的可靠性, 应减轻翼叶重量, 稳定主轴转速, 控制风轮偏转速度(不超过 $20^\circ/\text{s}$).

3) 风力机在气流速度变化下, 要达到稳定主轴转速, 可采取的方法: (1) 利用切向力 dF_θ 在驱动风轮转动的同时, 并使翼叶扭转的作用, 及切向离心惯性力的效应, 自动调整攻角的大小, 从而改变翼叶的气动特性. (2) 利用风轮侧偏回转力矩与恢复力矩的平衡, 调整风轮的侧偏角, 减轻风轮的受风面积.

参 考 文 献

- [1] 江宏俊, 流体力学(下册), 高等教育出版社, (1985), 159—165.
- [2] 史超礼, 航空概论, 北京航空学院出版社, (1986), 101.
- [3] M. n. 米里, 直升飞机计算和设计, 国防工业出版社, (1977), 274.
- [4] Eskinazi, S., 高宏智, 横轴风车的气动特性计算, 太阳能学报, 5, 4(1984), 391.
- [5] Etkin, B., *Dynamics of Atmospheric Flight*, John Wiley & Sons, Inc. (1972), 199—251.
- [6] Plint, M. A., *Fluid Mechanics a laboratory Course*, Charles Griffin Company Limited, (1978).

Aerodynamic Analysis on a Wind-Mill Generator of Horizontal Shaft Type

Lin Ruilin

(Department of Precision Mechanical Engineering)

Abstract This paper presents an aerodynamic analysis on a wind-mill generator of horizontal shaft type. The results may provide a basis for the reliable design of wind-mill generator and for its speed regulation whenever the wind speed changes.

Key words wind turbine generators, aerodynamic force, lift, drag, pitching moments, moment of inertia