

高速稳定风车的理论

〔苏联〕Г. X. 萨宾宁 著

中国工业出版社

PDG

采用的符号

$$A = \frac{iS}{\pi R^2} \text{—— 桨叶盘面充满度,}$$

α —— 冲角,

α_0 —— 当稳定桨叶在空气动力平衡时的冲角,

α_0 —— $c_y = 0$ 时的冲角,

$$a = \frac{dc_y}{d\alpha} \text{—— 对桨叶而言,}$$

$$a_c = \frac{dc_{yc}}{d\alpha} \text{—— 对稳定器而言,}$$

β —— 风轮旋转平面与相对气流速度之间的夹角,

b —— 桨叶宽 (米),

$2b$ —— 补偿重之间的距离,

$$B = \frac{2P}{\pi R^2 \rho V^2} \text{—— 盘面负荷系数,}$$

c —— 从桨杆轴心到补偿重轴心的距离,

$$c_x = \frac{2X}{S\rho V^2} \text{—— 桨叶的空气动力阻力系数,}$$

$$c_y = \frac{2Y}{S\rho V^2} \text{—— 桨叶上之负荷系数,}$$

M_x —— 空气动力对桨杆轴心之力矩,

$$m_x = \frac{2M_x}{Sb\rho V^2} \text{—— 空气动力对桨杆轴心之力矩系数,}$$

D —— 风轮直径 (米),

C —— 翼型厚度,

$$e = \frac{v_1}{V} \text{—— 风车平面上的气流阻滞系数,}$$

e_1 —— 桨叶动力学平面与翼弦之间的夹角,

$$F = \pi R^2 \text{—— 风车盘面面积,}$$

i —— 风车桨叶数,

J —— 带补偿重的桨叶对桨杆轴心之惯性矩,

J_n ——无补偿重桨叶的惯性矩,

k ——桨叶离心力矩的补偿系数,

m_c ——一个补偿重的质量,

$2m_m$ ——补偿重支杆的质量,

n ——风輪轉數,

L_c ——从稳定器轉动軸心到桨杆軸心之間的距离,

l_n ——桨叶可轉端部的长度,

l_c ——稳定器长度,

M ——风輪加在軸上的扭矩 (公斤·米),

M_n —— ξ_{max} 时之扭矩,

$$\bar{M} = \frac{2M}{\pi R^3 \rho V^2} \text{——相对力矩,}$$

M_a ——作用在桨叶上之空气动力对桨杆之力矩,

M_c ——作用在桨叶上的离心力对桨杆之力矩,

$$\mu = \frac{C_x}{C_y},$$

P ——作用在风輪上的空气动力在风輪軸心上的投影 (公斤),

ρ ——空气密度,

R ——风輪外半径 (米),

$$\bar{r} = \frac{r}{R} \text{——相对半径,}$$

r_0 ——风輪內半径 (米),

r_p ——从风輪旋轉軸心到桨叶或稳定叶端风压中心的距离,

r_{κ} ——桨叶固定部分的风輪半径,

S ——桨叶面积 (米²),

S_c ——稳定器面积 (米²),

t ——時間 (秒),

$$\tau = \frac{t}{T_n} \text{——時間与风輪每一轉延續時間之比,}$$

T_n ——风輪每一轉的时间,

T_{κ} ——桨叶繞桨杆軸心自由摆动的周期,

$$\bar{T}_{\kappa} = \frac{T_{\kappa}}{T_n} \text{——桨叶摆动的相对周期,}$$

T_r ——桨叶停止摆动时间,

$\overline{T_r} = \frac{T_r}{T_s}$ ——停止摆动的相对时间,

U ——稳定桨叶的离心-空气动力特性系数,

u ——在风輪平面上气流旋轉之圓周速度,

v_1 ——在风輪平面上气流軸向速度的增量,

V ——风車前很远处的风速 (米/秒),

W ——相对气流速度,

$z = \frac{\omega r}{V}$ ——半径 r 处的模数,

$Z = \frac{\omega R}{V}$ ——桨叶端之模数,

$Z_n = \frac{\omega_n R}{V}$ ——标准模数,

$z_u = \frac{\omega r + u_1}{V}$ ——相对模数,

ξ ——风能利用系数,

ω ——风輪旋轉角速度,

ω_1 ——桨叶自由摆动角速度,

φ, φ_R ——桨叶安装角。

目 录

采用的符号

I. 风车特性曲线形式的变化	1
风车高速性对其特性曲线的影响	1
转动桨叶对风车特性曲线的影响	5
转动桨叶端部的调节	17
用转动桨叶法的风车调节特性	21
作调节特性曲线	23
II. 稳定风车	27
稳定风车的工作原理	29
基素稳定风车	32
稳定风车的近似特性曲线	35
稳定风车特性曲线更精确的计算	37
III. 稳定风车桨叶动力学	39
自动调整桨叶动力学	39
补偿重	42
完全补偿与部分补偿	52
非正常补偿	53
桨叶的空气动力平衡	54
稳定桨叶的稳定性试验	61
稳定桨叶的离心-空气动力特性	67
桨叶的稳定性	72
正常补偿	75
非正常补偿	84
稳定桨叶动力学	87
IV. 带有稳定叶端的风车	108
稳定叶端	109
稳定叶端动力学	111
风轮尺寸对桨叶摆动周期的影响	115

IV

调节所需的功	116
带稳定叶端的试验型风车的例子	120
两种风车调节型式的比较	123
参考文献	127
附录	129

I. 风車特性曲綫形式的变化

风車高速性对其特性曲线的影晌

风車特性曲綫的形式主要由其高速性来决定。这里，我們只研究螺旋桨式的风輪。图 1 中表示出两个不同高速性风車的相对力矩特性曲綫。实綫表示低速风車 ($Z_n=1.15$)，虛綫表示高速风車 ($Z_n=4.5$)。桨叶的形式及其翼型的好坏对特性曲綫的形式影响不大，但对最大风能利用系数 ξ 及同步速度的大小有显著的影响。

图 2 所示是上述低速多叶及高速双叶两个风車的相对扭力矩 $\bar{M}$ 与风能利用系数 ξ 。横座标表示模数 Z ，纵座标——相对扭力矩 M 与风能利用系数 ξ 。

从这些特性曲綫的比較中，可以很清楚地看出两种形式的风車的差別来。在相当于 ξ 为最大时的标准工作状态下，这两种风車是相同的，因为轉速的差別可以选择适当的机器与工具之間的传动来消除，而在另外的工作状态

时，其特性曲綫的形式却全然不同，特别是左部，也就是风車达到标准速度以前的起动与加速部分更不同。

低速风車的起始力矩超过标准力矩的 75%，而双叶高速风車的起始力矩只有标准力矩的 12%。与此同时，高速风車在标准状态时所发出的功率比风輪直径相同的低速风車大。这一点可在

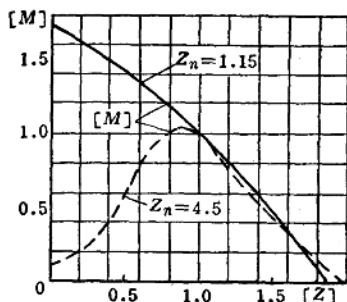


图 1 高速双叶风車及低速18叶风車的相对力矩特性曲綫，座标軸上記出的是力矩、模数和功率最大时的力矩与模数之比

风能利用系数 ξ 的图中看出 (图 2)。

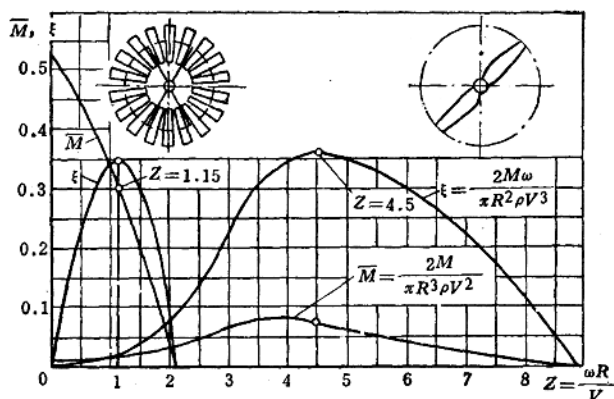


图 2 低速与高速风车之力矩 M 与功率 ξ 之相对特性曲线

图 3 与图 4 所示为一组不同高速性的高速风车的特性曲线，其桨叶数 $i=2, 3, 4$ 及 6 [4]。图 5 为该组风车的图形。这四种风车的特性曲线为了比较如图 6 所示，采取 $\xi_{\max}$ 时的力矩与模数作为度量的单位。该组风车基本特性数据见表 1。由图 6 我们看到，当高速性由 $Z_n=2.6$ 增加到 $Z_n=5.5$ 时，相对起始力

表 1

桨叶数 i	标准模数 Z_n	同步模数 Z_o	风能利用系数 ξ ①	标准工 作力矩 M_n	$\frac{M_1}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	同步速度 $\frac{Z_o}{Z_n}$
1	2	3	4	5	6	7	8
6	2.6	7.1	0.475	0.175	0.38	1.13	2.74
4	3.3	8.3	0.47	0.142	0.25	1.05	2.51
3	4.0	9.1	0.45	0.113	0.17	1.21	2.28
2	5.5	11.1	0.45	0.084	0.12	1.18	2.1

① 所得的系数 ξ 过大一些，其原因是在整理试验结果时，对风洞壁的影响修正得太少。

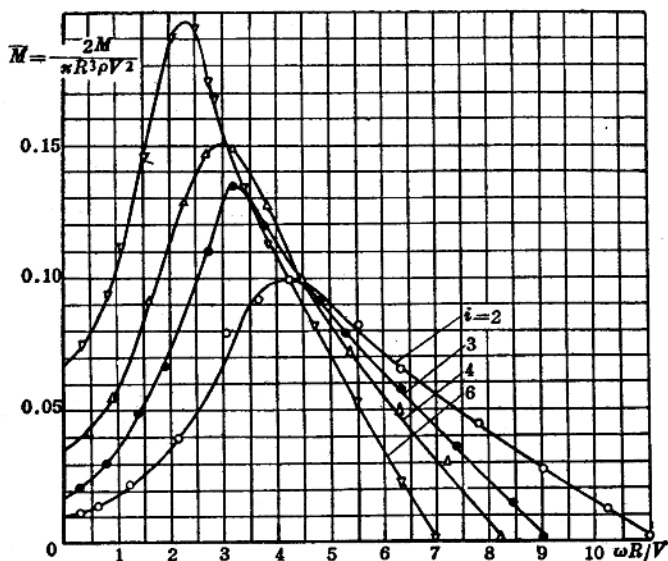


图 3 $D=0.5$ 米桨叶数 $i=2, 3, 4, 6$ 的一组高速风车的力矩特性曲线

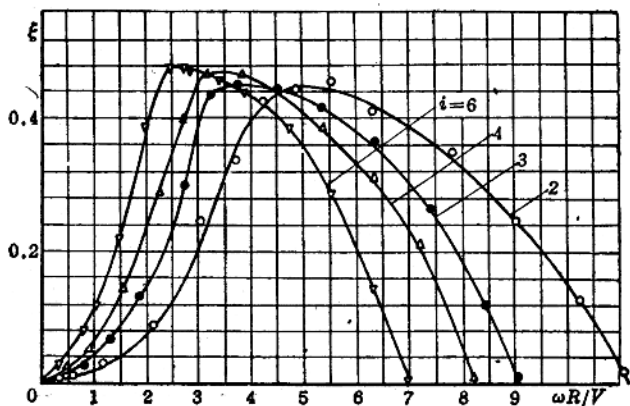


图 4 $D=0.5$ 米桨叶数 $i=2, 3, 4, 6$ 的一组高速风车的功率特性曲线

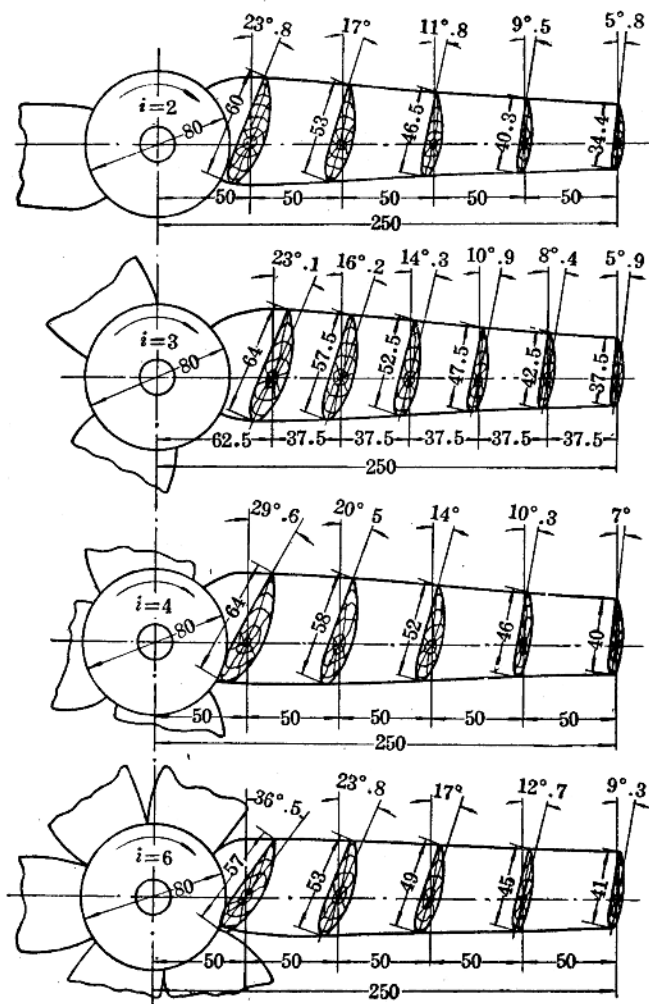


图 5 $D=0.5$ 米桨叶数 $i=2, 3, 4, 6$ 的一组风车图形

矩就由六叶风车的 $\frac{M_1}{M_n} = 0.38$ 下降到双叶风车的 $\frac{M_1}{M_n} = 0.12$ 。

而模数为8的 ВИСХОМ 2АР-28 型双叶风车其相对起始力矩只有标准力矩的0.05。

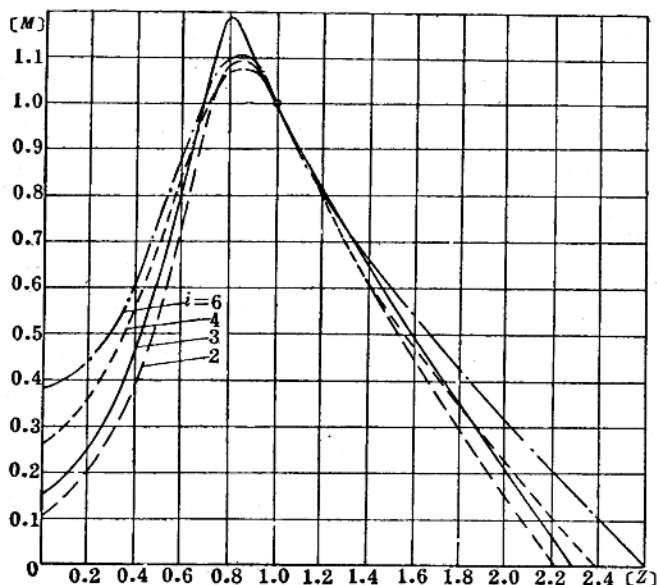


图 6 $D=0.5$ 米桨叶数 $i=2, 3, 4, 6$ 的一组风车的相对力矩特性曲线

转动桨叶对风车特性曲线的影响

高速风车的起始力矩很小，给它的起动和加速带来很大的困难。高速风车必须卸去负荷后起动，而低速风车可以在满负荷下起动。为了加大起始力矩，H.B. 克拉索夫斯基及其他的一些风车建造者建议在风车起动时让桨叶与旋转平面成较大的角度。但是，要使桨叶在所有加速状态时，都能自动的处在最有利的角度下，其机构必须相当复杂，特别是当风车桨叶的尺寸很大时，这

一机构还要克服巨大的空气动力与离心力。据作者所知，有这种自动机构的风车，没有得到应用。

为了阐明风车在加速状态时其特性曲线究竟能有多大的改善，作者在 1926—1927 年在庫金的空气动力实验室中曾进行了试验。

作出了各种风车模型的特性曲线，其桨叶是按照薩宾宁-尤里也夫（简称 CIOP）的原理设计的，并以各种不同的角度来安装的。图 7、8 与 9 所示为桨叶的图形与试验所得出的特性曲线。

桨叶的翼型是轉化椭圆，其厚度 $\frac{c}{b}=0.2$ 。从桨叶端部度量桨

叶相对于旋轉平面的安装角为 $\varphi=10^\circ 7'$ ，此角度符合于理論計算值， $\varphi=14^\circ、17^\circ、20^\circ、25^\circ、32^\circ、40^\circ、50^\circ、60^\circ$ 与 70° 。必須指出，特性曲线的变化是有严格的规律的。随着桨叶安装角 φ 的增加，力矩曲线的頂部逐渐降低，同时变得不明显了。最大相对力矩由 $\varphi=10^\circ 7'$ 时， $\bar{M}_{\max}=0.090$ 降到 $\varphi=70^\circ$ 时， $\bar{M}_{\max}=0.027$ 。标准工作模数由 $Z_n=4.75$ 降到 $Z_n=0.42$ 。特性曲线的右边十分接近于直线，而其坡度随 φ 角的增加而增加。

特性曲线的左边儼如中心在纵坐标上的抛物线，愈往左則离横坐标愈高。

相对起始力矩随 φ 角的增加而增加， $\varphi=10^\circ 7'$ 时 $\bar{M}=0.01$ ， $\varphi=60^\circ$ 时 $\bar{M}=0.035$ ，当 $\varphi=70^\circ$ 时，又重新下降到 $\bar{M}=0.025$ 。在桨叶安装角 $\varphi=70^\circ$ 时，简单的理論計算所得出的起始力矩值几乎要比試驗所得的值大两倍。因此希望靠理論計算来获得轉动桨叶时的起始力矩，使它能可靠的与工作情况相比拟，实验証明是行不通的。这个看来自相矛盾的现象可以这样来解释：气流在全长上以不同的冲角流经桨叶的情况与計算时的假设是不一致的。我們认为在桨叶的全部断面上都流过面平行的互不相干的气流，而事实上，由于冲角的差别沿桨叶具有由一个断面流向另一断面的横流，这就完全破坏了所假定的状况，而引起 $\bar{M}_1$ 值的急剧下降。我們将在研究带平桨叶的风车特性时論証这一事实。

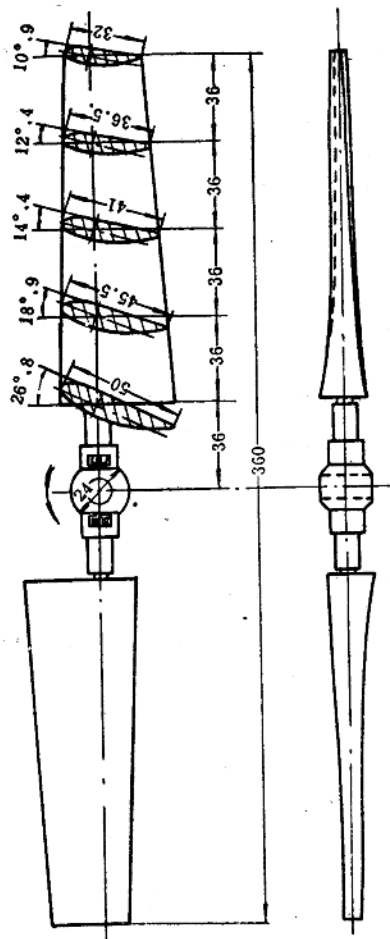


图 7 按薩賓宁-尤里也夫理論計算的 CIOP 型双叶風車, $D=0.36$ [米]

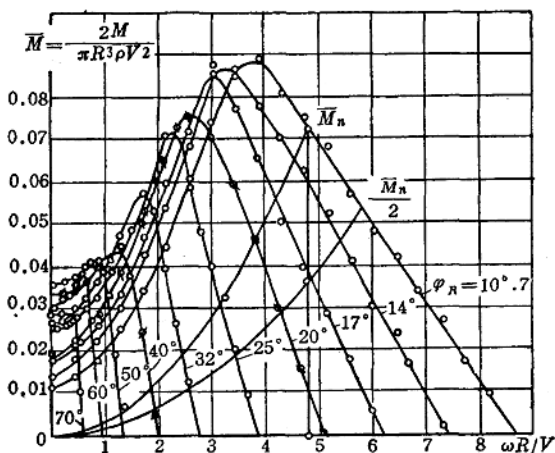


图 8 $D=0.36$ 米的 CIOP 型双叶风车在桨叶各种不同安装角下的力矩特性曲线

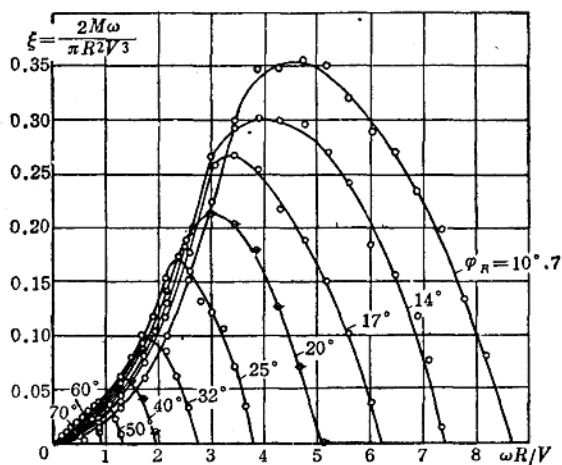


图 9 $D=0.36$ 米的 CIOP 型双叶风车在桨叶各种不同安装角下的功率特性曲线

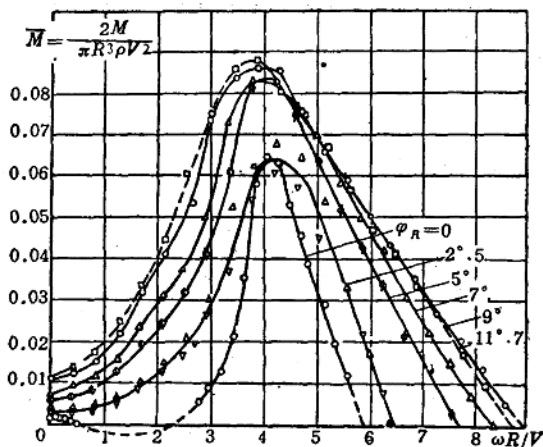


图 10 $D=0.36$ 米的 CIOP 型双叶风车在桨叶各种不同安装角下的力矩特性曲线

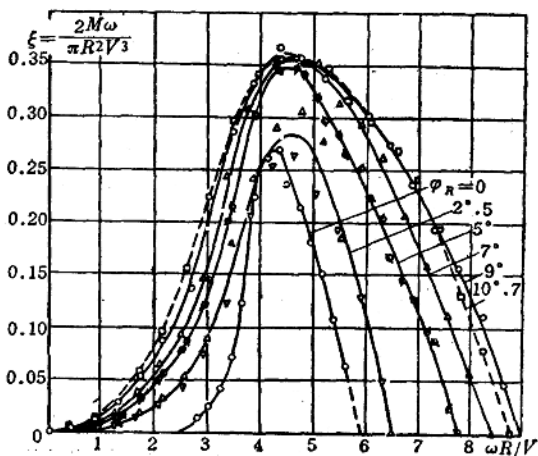


图 11 $D=0.36$ 米的 CIOP 型双叶风车在桨叶各种不同安装角下的功率特性曲线

因此我們所研究的风車其相对起始力矩可以用旋轉桨叶的方法由 $\bar{M}_1 = 0.01$ 提高到 $\bar{M}_1 = 0.035$ ，即提高两倍半，但是它仍比工作力矩小一半。

为了掌握旋轉桨叶調节的整个过程，对同一风車进行了第二組試驗，获得了小桨叶安装角时的特性曲綫即 $\varphi_R = 10^\circ$ 、 7° 、 5° 与 0° 。

图 10 和 11 所示，为这些試驗的結果。特性曲綫的形式与以前有些不同。在这里，我們看到，減少 φ_R 角时 $M_{\max}$ 降低，而在第一組試驗中 $M_{\max}$ 降低是因 φ_R 角增加产生的。特性曲綫照例是一个比一个低，一般的規律是，对每一个 Z 值而言，当減小 φ_R 角时，力矩均將減小，在特性曲綫的右边和左边都減小，而在第一組中特性曲綫一个与另一个相交，在左边对給定的 Z 值，纵座标随 φ_R 的增大而上升，在右边則相反。

当进行第二組試驗时，到角 $\varphi_R = 0$ 为止，因为再減小角 φ_R 时起始力矩变为負值，虽說在轉数增加以后它仍可能产生正力矩，但是风車不能起动。同样在角 $\varphi_R = 0$ 时，力矩开始时具有正值直到 $Z = 0.5$ ，此后大約到 $Z = 2.5$ 以前变为負值，再以后又重新变为正的。当 $Z \approx 4$ 时，力矩达最大值 $\bar{M} = 0.065$ ，在負力矩的情况下风車模型由另外的能源来驅動。

如果我們作出全部力矩特性曲綫的包絡綫（图 8），則得到在加速时轉动整个桨叶来調节高速风車所能达到的最好的特性曲綫。正如我們所看到的，起始力矩在最好的情况下也只能达到工作力矩的一半。

为了闡明具有扭轉桨叶的风車其起始力矩下降的現象，制造了双叶风車模型，它与以前的模型尺寸和翼型断面相同，但是桨叶的所有断面均制成相同的安装角 φ_R ，也就是說它們从空气动力学上看是平的（图 12）。

做这个試驗尚有第二个目的，即将制造比較简单的平桨叶风車的特性曲綫与桨叶是在沿半径的气流阻滯保持不变的条件下按照空气动力計算来制造的风車加以比較，图 13、14 所示为各种

不同桨叶安装角 $\varphi_R = 12^\circ, 14^\circ, 17^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 32^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ 与 85° 下的力矩与功率特性曲线。

从图 13 中我们看到，当角 $\varphi_R = 80^\circ$ 时，起始力矩实际上与桨叶最好的安装角 $\varphi_R = 12^\circ$ 时的最大力矩相等，并且能很好的符合此角度的理论计算值，其 $\bar{M}_1 = 0.083$ 。

然而在起动时，力矩却很快下降，而且看出，无论桨叶怎样转动都不能保持足够的高度，因为与它最接近的 $\varphi_R = 75^\circ$ 时的特性曲线给出的加速力矩相当小。

力矩特性曲线的包络线与《СКОР》型风车的包络线相反，出现了很大的凹陷部分，其最小值出现在 $Z = 0.8$ 附近，同时此最小值与《СКОР》型风车的力矩特性曲线的包络线（图 8）在相同的模数时的力矩值很接近。因此，平桨叶仅仅改善了风车起动的开始阶段，从 $Z = 0.5$ 时起，两种风车实际上就是一样了。

风车特性曲线的包络线在 $Z = 0.5 - 1.0$ 之间的凹陷，同

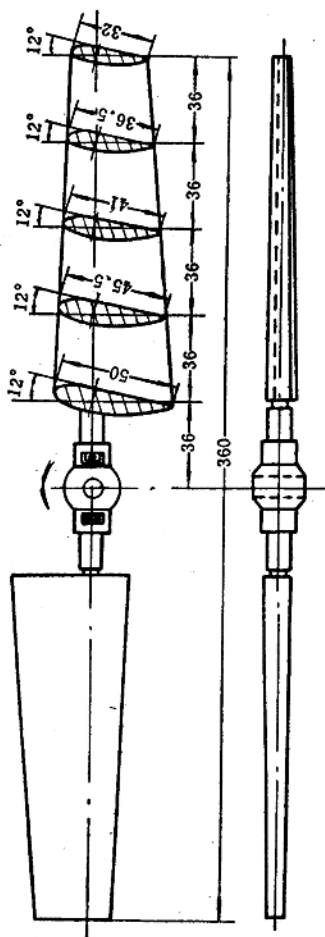


图 12 $D = 0.36$ 米的平桨叶双叶风车