



大学物理现代技术实验——风力发电

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2023 年 6 月 10 日

摘要：随着全球经济的发展，对能源的需求日益增加，对环境的保护更加重视，风力发电越来越受到世界各国的青睐。本实验通过对风力发电机关键参数的测量，探究影响风力发电效率的有关因素，定量地描述了风力发电功率与风力大小的关系。

关键词：风力发电，效率，叶尖速比；

1 实验目的

1. 测定风速，螺旋桨转速（也是发电机转速），发电机感应电动势之间关系的测量。
2. 扭曲型可变桨距 3 叶螺旋桨的功率系数 CP 与风轮叶尖速比关系的测量。
3. 切入风速到额定风速区间的功率调节实验。

2 实验原理 [1, 2]

2.1 风能与风速测量

设风速为 v_1 ，单位时间通过垂直于气流方向、面积为 S 的截面的气流动能为：

$$E = \frac{1}{2} \rho S v_1^3$$

由气体状态方程，密度与气压 p 、热力学温度 T 的关系为：

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \approx 3.48 \times 10^{-3} \frac{p}{T}$$

其中 $M = 2.89 \times 10^{-2} \text{kg/mol}$ 为空气的摩尔质量， $R = 8.31 \text{J}/(\text{molK})$ 为普适气体常数。气压会随海拔高度 h 变化，代入 273.15K 时反映气压随高度变化的恒温气压公式：

$$p = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}h} \approx p_0 \left(1 - \frac{Mg}{RT}h \right) = 1.013 \times 10^5 (1 - 1.25 \times 10^{-4}h)$$

其中 $g = 9.8 \text{m/s}^2$ 为重力加速度。代入上面的密度表达式，可以知道：

$$\rho = 3.53 \times 10^2 \frac{1 - 1.25 \times 10^{-4}h}{T}$$

这个式子就表明表明海拔高度和温度是影响空气密度的主要因素，它是一种近似计算公式，实际上，即使在同一地点，同一温度，气压与湿度的变化也会影响空气密度值。在不同的书籍中，经常可看到不同的近似公式。

测量风速有多种方式，目前用得较多的是旋转式风速计及热线（片）式风速计。

旋转式风速计是利用风杯或螺旋桨的转速与风速成线性关系的特性，测量风杯或螺旋桨转速，再将其转换成风速显示。旋转式风速计的最佳测量范围是 5 ~ 40m/s。

热线（片）式风速计有一根被电流加热的金属丝（片），流动的空气使它散热，利用散热速率和风速之间的关系，即可制成热线（片）风速计。在小风速（5m/s 以下）时，

热线（片）式风速计精度高于旋转式风速计。

在本套实验仪器中，由于风速与风源电机（即风扇）转速成一一对应关系，所以在出厂前已通过风扇转速对风速进行了校准，故在本套实验仪器中并未使用风速传感器来测量风速，而是通过风扇转速转换成风速显示在风速表上。



2.2 风能的利用

以 v_1 表示风机上游风速， v_0 表示流过风机叶片截面 S 时的风速， v_2 表示流过风扇叶片截面后的下游风速。Bethe 的风机模型允许我们得到风机的理论最大功率和最大效率：

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} \approx 0.5926$$

对于实际风机，功率可以被表为：

$$P_o = \frac{1}{2} C_p \rho S v_1^3$$

其中 C_p 是风机的实际风能利用系数，随风机的叶片形式和工作状态而改变，并且总小于 Bethe 极限。商用风机一般在 $C_p = 0.4$ 左右。在风电机组的设计过程中，通常将螺旋桨转速与风速的关系合并为一个变量——叶尖速比，定义为螺旋桨叶片尖端线速度与风速之比，即：

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1}$$

ω 为螺旋桨角速度， R 为叶片尖端对应的半径。对于同一螺旋桨，在额定风速内的任何风速，功率系数与叶尖速比的关系都是一致的。不同翼型或叶片数的螺旋桨， C_p 曲线的形状不一样， C_p 最大值与最大值对应的 λ 值也不一样。

3 实验仪器

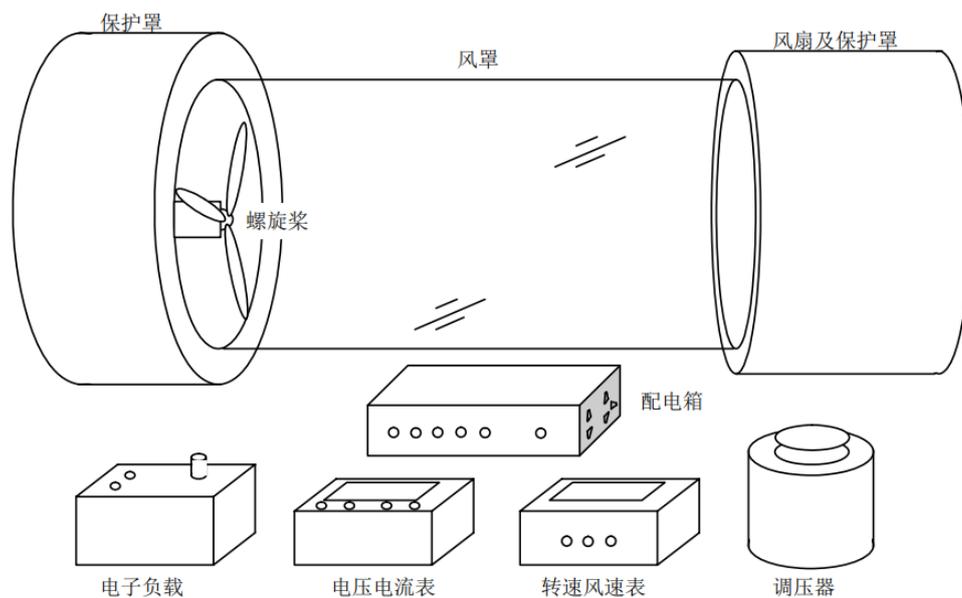


图 1: 实验仪器示意图

实验仪器正是上图所展示的实验装置。



4 实验步骤

风扇连接到调压器输出端，调压器连接到配电箱市电接口，电子负载、电压电流表、风速转速表的电源端分别连接到配电箱的低压直流电源孔，风速转速表中同步信号输出连接到配电箱中的同步信号接口，转速，风速输出连接到转速风速表。电子负载及电压、电流表的同步信号端口不连接，作以后功能扩展用。

4.1 风速、螺旋桨转速（即发电机转速）、发电机感应电动势之间关系的测量

实验前确认扭曲型可变桨距 3 叶螺旋桨处于最佳桨距角（即风叶离指示圆点最近的刻度线对准风叶座上的刻度线），风叶凹面朝向风扇，将螺旋桨安装在发电机轴上（紧固螺帽是反螺纹，紧固与松开的旋转方向与普通螺纹相反）。断开电子负载，此时电压表测量的是开路电压，即发电机输出的电动势。调节调压器使得风速从 5.0m/s 开始以 0.5m/s 的间隔来逐渐调低风速，风速稳定后记录在不同风速下的螺旋桨转速及发电机感应电动势。

4.2 扭曲型可变桨距 3 叶螺旋桨的功率系数 C_p 与叶尖速比 关系的测量

调节调压器，使风速为 5.0m/s。接上电子负载，逆时针旋转电子负载旋钮，直到电流显示不为零，然后顺时针旋转电子负载旋钮使电流显示刚好为零，各表显示稳定后记录输出电压、输出电流、转速。逆时针调节电子负载调节旋钮，使输出电压以每隔 1.0V 进行调节，

4.3 切入风速到额定风速区间的功率调节实验

风机的运行受两方面的限制，一是由机械强度决定的转速限制，二是由发电机、变流器容量决定的功率限制。若整机设计导致运行时先达到功率限制，则切入风速到额定风速之间采用统一的调节方案，本实验只考虑这种情况。

若整机设计导致运行时先达到转速限制，则要采用两段控制方案，达到转速限制后需调节负载保持转速恒定，风力增大时转速不变而转矩增大，输出功率增加，直至达到功率限制。

本实验比较固定叶尖速比、固定转速 2 种方式下，风机输出功率的情况。

固定叶尖速比调节方式时，由内容 2 确定最佳叶尖速比 λ_m ，由 $f = \lambda_m v_1 / 2\pi R$ 计算最佳转速，在各风速下通过调节电子负载使风机转速达到最佳转速，记录输出电压，电流于表 3 固定叶尖速比列下。

固定转速调节方式时，一般使转速在额定风速时 C_p 达到最大。若随意选择转速，风能利用效率会更低。固定转速调节方式时，不同风速下调节电子负载大小，保持转速不变，记录风速变化时风机输出电压，电流。

5 数据分析与处理

5.1 风速与转速关系

表 1: 风速与风机转速关系

风速 (m/s)	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5
转速 (r/s)	48	43	38	32	26	19
电动势 (V)	25.0	22.3	19.2	15.9	12.7	9.6

对风机转速和风速作线性拟合，得到相关系数 $r = 0.997931$ ，这就说明转速和风速具有良好的线性关系，拟合得到的图像如下：

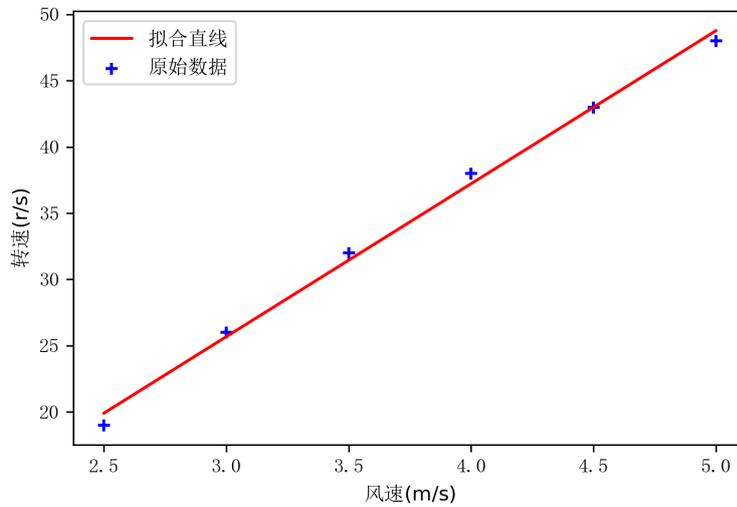


图 2: 风速-转速关系线性拟合

对风机转速和电动势作线性拟合, 得到相关系数 $r = 0.998704$, 这就说明转速和电动势也具有良好的线性关系, 拟合得到的图像如下:

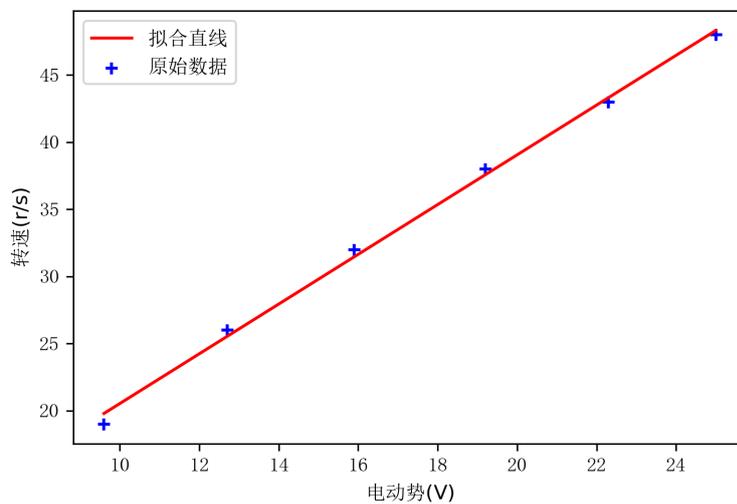


图 3: 电动势-转速关系线性拟合

5.2 功率系数与叶尖速比的关系

实验前, 实验室提供了海拔 $h = 29.8\text{m}$, 温度 $T = 23^\circ\text{C}$, 计算可得空气密度为 $\rho = 1.188\text{kg/m}^3$. 另外, 叶片半径为 $R = 0.134\text{m}$, 风速为 $v_1 = 5\text{m/s}$. 在此基础上, 实验数据如下表:

绘制出 λ 和 C_p 的图像如下:



表 2: 扭曲型可变桨距 3 叶螺旋桨的功率系数与叶尖速比的关系

f (r/s)	U (V)	I (mA)	P (W)	$\lambda = 2\pi fR/v_1$	$C_p = 2P/\pi R^2 \rho v_1^3$
48	24.0	0	0.000	8.083	0.000
48	23.0	4	0.092	8.083	0.022
47	22.0	9	0.198	7.914	0.047
46	21.0	19	0.399	7.746	0.095
45	20.0	30	0.600	7.578	0.143
43	19.0	38	0.722	7.241	0.172
42	18.0	48	0.864	7.072	0.206
41	17.0	68	1.156	6.904	0.276
39	16.0	74	1.184	6.567	0.283
38	15.0	84	1.260	6.399	0.301
37	14.0	94	1.316	6.230	0.314
35	13.0	107	1.391	5.894	0.332
33	12.0	118	1.416	5.557	0.338
32	11.0	124	1.364	5.388	0.326
30	10.0	131	1.310	5.052	0.313

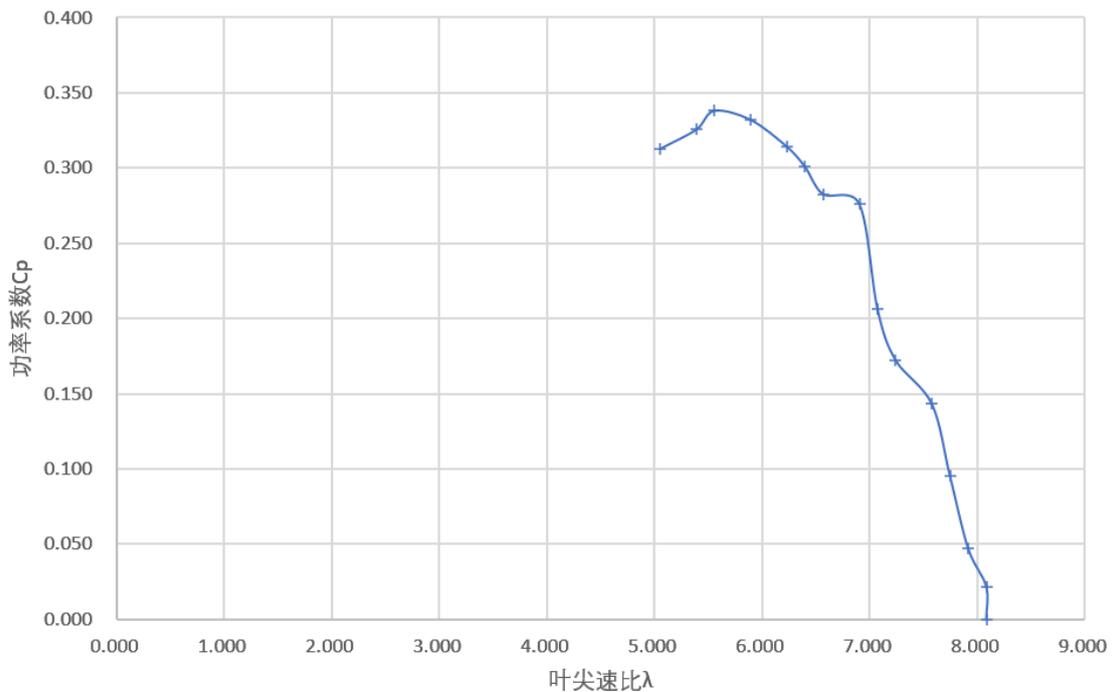


图 4: $\lambda-C_p$ 关系图



通过阅读图表，可以看出在 $f = 33r/s$ ，对应叶尖速比 $\lambda = 5.557$ 时，具有最大的功率系数。绘制出的图像与标准图像对比，大体趋势相似，可以视为一种验证。

5.3 最佳转速和最佳叶尖速比下的功率计算

当固定叶尖速比 $\lambda \approx 5.56$ 时，实验结果如下：

表 3: 固定叶尖速比时的功率-风速关系

v_1 (m/s)	$f = \lambda_m v_1 / 2\pi R$	U (V)	I (mA)	P (W)
5.0	33	12.0	118	1.416
4.5	30	11.3	90	1.017
4.0	26	9.6	72	0.691
3.5	23	9.0	46	0.414
3.0	20	7.6	30	0.228

绘制出功率-风速关系图像为：可以看出，大体呈正相关，但是增长按照线性还是更高幂次项需要更多数据点才能

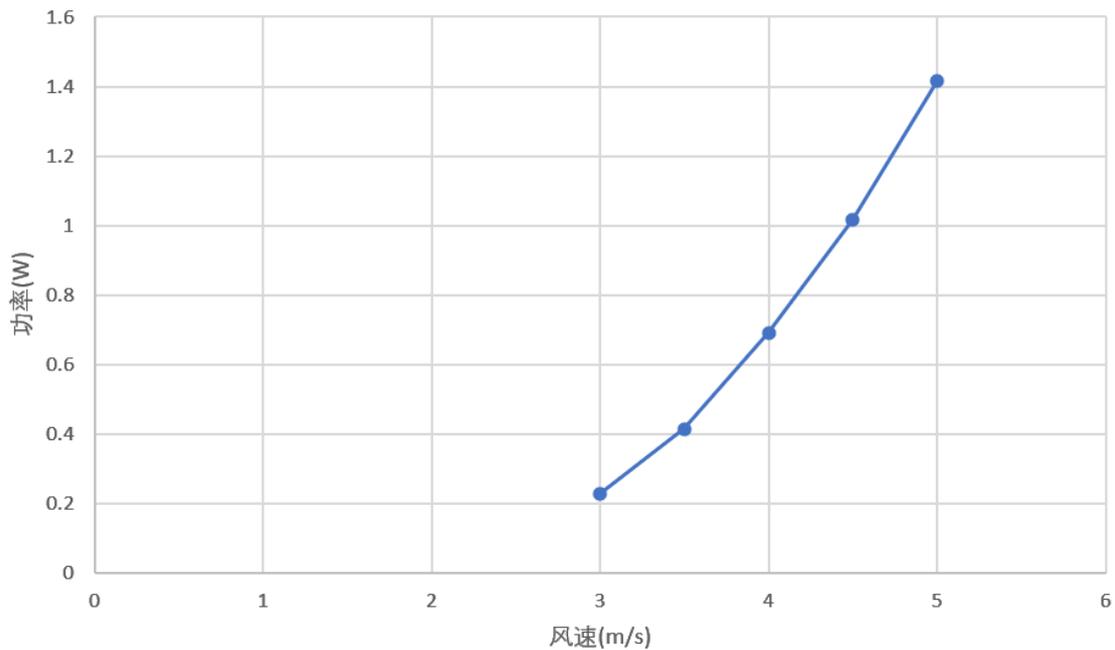


图 5: 固定叶尖速比时的功率-风速关系图

确定。



当固定转速 $f = 5\lambda_m/2\pi R \approx 33\text{r/s}$ 时，实验结果如下：

表 4: 固定叶尖速比时的功率-风速关系

$v_1(\text{m/s})$	$f(\text{r/s})$	$U(\text{V})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{W})$
5.0	33	12.0	118	1.416
4.5	33	13.2	72	0.950
4.0	33	14.1	35	0.494
3.5	无法达到	-	-	-
3.0	无法达到	-	-	-

绘制出功率-风速关系图像为：可以看出，大体呈线性正相关，但是增长按照线性还是更高幂次项需要更多数据点

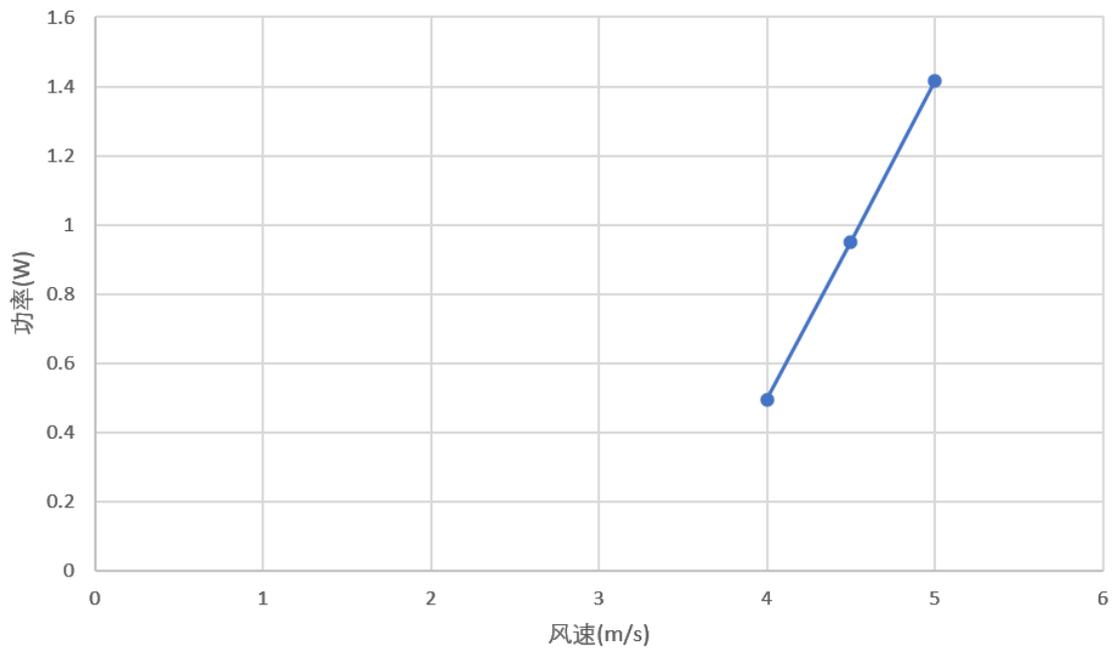


图 6: 固定叶尖速比时的功率-风速关系图

才能确定，本实验中由于电流限制原因，无法测定更低风速的数据了。

6 总结

我们利用风力发电装置进行实验，测定出了能量转化效率最大时对应的叶尖速比参数，同时在不同条件下测得了功率与风速的关系。整体上，风力发电的输出功率总是和风速正相关增长的，这也符合我们的预期；而进一步的定量关系则因为没有更多数据而只能暂时搁置了。



参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 风力发电实验 (实验讲义). Apr. 13, 2022. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20220413/db9e429d0f42ec5562fe536ee26f558b.pdf> (visited on 06/05/2023).
- [2] 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣. 大学物理实验. 2nd ed. Vol. 第二册. 北京: 高等教育出版社, 2005.