



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

本科实验报告

风能电能转换研究

课程名称: 基础物理实验

姓名:



学院:

钱学森学院

专业:

少年班

学号:



指导老师:

曹子君

2026 年 5 月 24 日

西安交通大学实验报告

专业：少年班
姓名：
学号：
日期：2026 年 5 月 24 日
地点：仲英楼 B503

课程名称：基础物理实验 指导教师：曹子君 成绩：
实验名称：风能电能转换研究 实验类型：测量实验 同组：

一、实验原理

本实验研究小型风洞系统中风能与电能之间的相互转换关系。实验装置由直流风机、风洞、风力发电机和外接负载组成。实验过程包括风机端的电能向气流动能转换，以及发电机端的气流动能向负载电能转换。

稳压电源向风机输入的电功率为

$$P_0 = UI,$$

式中 U 为风机输入电压， I 为输入电流。设风洞截面积为 S ，空气密度为 ρ ，风速为 V ，则通过该截面的风能功率可表示为

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho S V^3.$$

本实验温度为 26.9°C ，计算中取空气密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 。由上式可知，风能功率与风速的三次方成正比，因此风速测量误差会显著影响风能功率及相关效率的计算结果。

风机将电能转化为风能的效率定义为

$$\eta = \frac{P_{\text{wind}}}{P_0} \times 100\%.$$

当风力发电机接入负载电阻 R 后，负载两端电压记为 U_{load} ，发电机输出功率为

$$P_{\text{out}} = \frac{U_{\text{load}}^2}{R}.$$

若以发电机叶片扫掠面积 S_{blade} 计算入射风能，则风能到电能的转换效率为

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{wind,blade}}} \times 100\%.$$

对于给定风速，负载电阻过小会使端电压降低，负载电阻过大则会限制输出电流，两种情况下输出功率均难以达到最大值。因此，风力发电机在不同风速下通常对应不同的最佳负载区间。

二、实验仪器

实验主要仪器及用途列于表 1。实验环境温度为 26.9°C ，相对湿度为 69%，地点为仲英楼 B503 实验室。

表 1：实验仪器与主要参数

仪器	主要用途或参数
直流稳压电源	为风机供电，输出电压可调范围为 0 ~ 30 V
小型风洞装置	内含直流风机，风洞内径为 103.50 mm
数字风速仪	置于风洞出口处，用于测量出口风速
风力发电机模块	叶片直径为 79.58 mm，安装于风洞出口处
旋转式电阻箱	提供 400 ~ 2000 Ω 范围内的可调负载
数字万用表	测量负载电阻两端电压

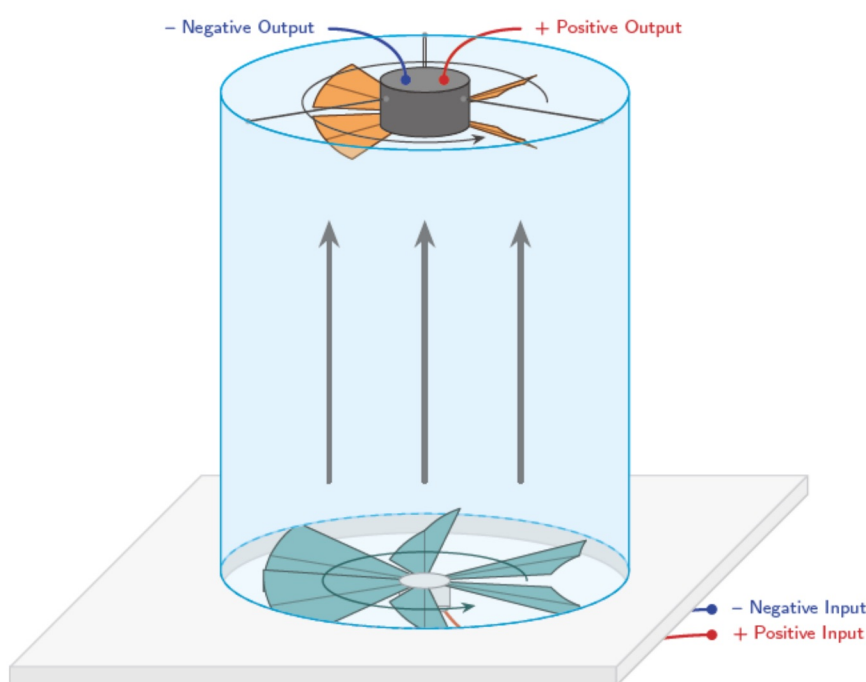


图 1：风洞与风力发电机装置示意图

三、 实验步骤

- (1) 测量风机输入电压与风速的关系。将直流风机接至稳压电源，在风洞出口处固定风速仪探头位置。风机电压由 10 V 增至 26 V，步长为 2 V。每一档待读数稳定后，记录风速以及电源显示的电压、电流。
- (2) 测量不同负载下的发电机输出特性。将风力发电机安装在风洞出口，输出端连接电阻箱，并用万用表测量负载电压。分别在风机电压为 16 V 和 24 V 的条件下，将负载电阻从 400 Ω 调至 2000 Ω ，记录各阻值对应的负载电压。
- (3) 测量固定负载下输出功率随风速的变化。固定负载电阻为 1000 Ω ，改变风机输入电压并记录负载电压。由于 10 V 时风力发电机未能启动旋转，该点的负载电压记为空缺；数据处理中相同风机电压对应的风速取第一部分的测量结果。

四、 数据处理与结果分析

1. 风机电压与风速及风能的关系

风洞内径 $d = 103.50\text{ mm}$ ，截面积

$$S = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 8.413 \times 10^{-3}\text{ m}^2.$$

表 2 给出了不同风机输入电压下的输入电流、实测风速、输入电功率 P_0 、风洞截面风能功率 P_{wind} 以及电能到风能的转换效率 η 。

表 2: 风机电压与风速及风能的关系

$U\text{ (V)}$	$I\text{ (A)}$	$V_1\text{ (m/s)}$	$P_0\text{ (W)}$	$P_{\text{wind}}\text{ (W)}$	$\eta\text{ (\%)}$
10	0.062	2.964	0.620	0.1320	21.29
12	0.078	3.510	0.936	0.2192	23.42
14	0.095	3.742	1.330	0.2656	19.97
16	0.113	4.126	1.808	0.3561	19.69
18	0.131	5.120	2.358	0.6804	28.85
20	0.151	6.031	3.020	1.1120	36.82
22	0.171	6.391	3.762	1.3232	35.17
24	0.194	7.237	4.656	1.9213	41.27
26	0.217	7.673	5.642	2.2899	40.59

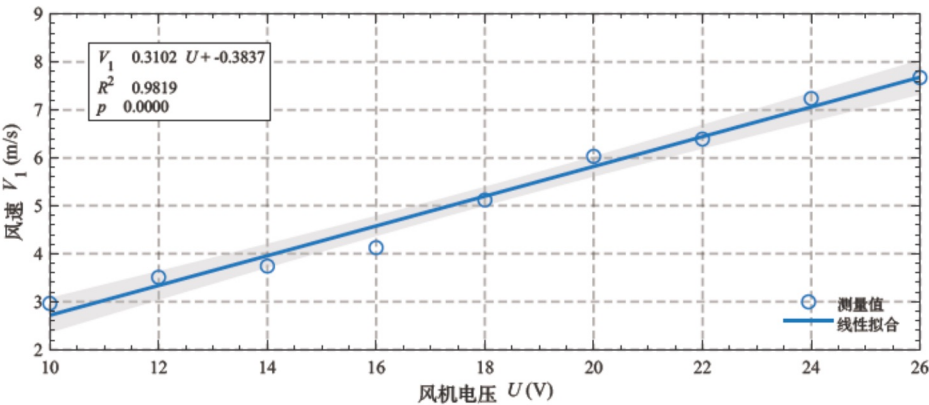


图 2: 风机电压与风速关系曲线

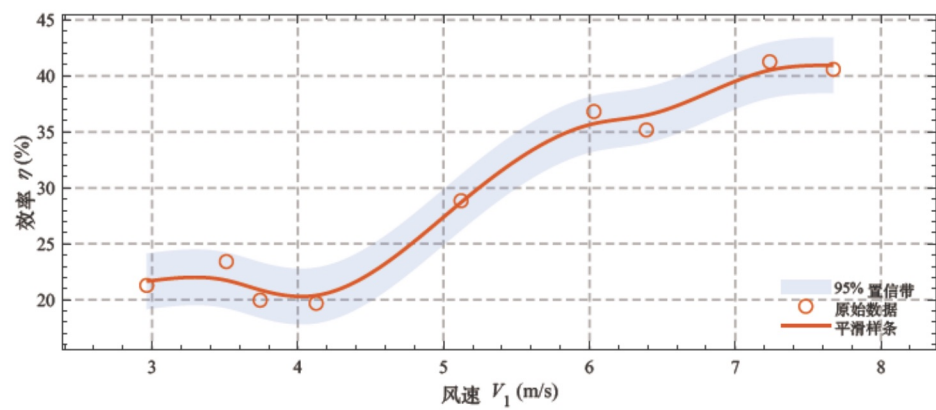


图 3：不同风速下电能到风能的转换效率

由表 2 和图 2 可见，在 10 ~ 26 V 的实验范围内，风机输入电压增大时，风洞出口风速基本单调增大，二者近似呈线性关系。这说明在本实验工况下，直流风机转速随输入电压的增加而提高，风洞出口流速能够较稳定地响应电压调节。

转换效率曲线如图 3 所示。低电压区间内，电能到风能的转换效率约为 20%；当风机电压提高至 18 V 以后，效率明显上升，并在较高风速下接近 40%。这一变化表明，小型风机在低转速下存在较明显的机械摩擦、叶片气动损失和流动扰动损失；随着转速升高，叶片工作状态改善，更多输入功率转化为沿风洞方向的有效气流动能。需要指出的是，由于本实验采用单点风速测量，表中风能功率代表的是基于出口测点风速估算得到的结果，而非严格意义上的截面平均风能功率。

2. 风力发电机输出特性

固定风机电压为 16 V 和 24 V 两种工况，其对应风速分别约为 4.126 m/s 和 7.237 m/s。改变负载电阻并测量发电机负载电压，可计算得到输出功率，结果列于表 3。

表 3：不同负载电阻下风力发电机的输出功率

R (Ω)	U_1 (V, 16 V)	P_1 (W, 16 V)	U_2 (V, 24 V)	P_2 (W, 24 V)
400	1.617	0.0065	5.74	0.0824
600	3.160	0.0166	7.73	0.0996
800	4.470	0.0250	9.25	0.1070
1000	5.370	0.0288	10.33	0.1067
1200	5.980	0.0298	11.26	0.1057
1400	6.480	0.0300	12.06	0.1039
1600	6.920	0.0299	12.81	0.1026
1800	7.320	0.0298	13.34	0.0989
2000	7.530	0.0284	13.92	0.0969

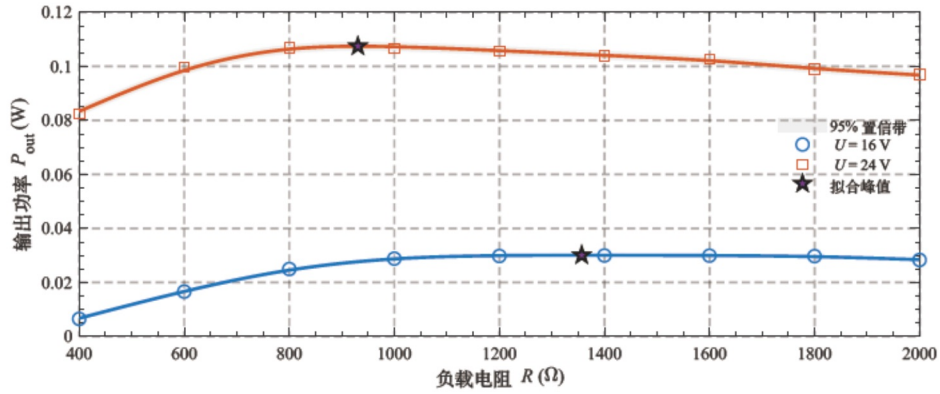


图 4：不同风速下风力发电机输出功率与负载电阻的关系

图 4 显示，在两种风速下，输出功率均不是随负载电阻单调变化，而是先增大后减小。风机电压为 16 V 时，输出功率在 $R = 1400 \Omega$ 附近达到最大值，约为 0.0300 W；风机电压为 24 V 时，最大功率点移动到 $R = 800 \sim 1000 \Omega$ 附近，最大功率约为 0.1070 W。

这一现象可用等效电源模型作定性解释：在某一稳定转速下，风力发电机可近似看作具有内阻的电源，外接负载与其等效输出特性匹配时，负载获得的功率较大。随着风速升高，发电机转速、感应电动势以及机电耦合状态均发生变化，因此最佳负载电阻也会随之改变。本实验结果说明，若希望在不同风速下保持较高输出功率，需要根据风速或端口输出状态调节外接负载，而不能简单采用固定电阻作为最优负载。

3. 固定负载下输出功率随风速的变化

固定负载电阻 $R = 1000 \Omega$ 。发电机叶片扫掠面积为

$$S_{\text{blade}} = \pi \left(\frac{79.58 \text{ mm}}{2} \right)^2 = 4.974 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

逐步提高风机电压以改变风速，测得负载电压并计算输出功率、入射风能功率及发电机转换效率，结果如表 4 所示。

表 4：固定 1000 Ω 负载时输出功率与风速的关系

U_{fan} (V)	U_{load} (V)	P_{out} (W)	V_1 (m/s)	P_{wind} (W)	η_{gen} (%)
10	—	—	2.964	0.0780	—
12	0.652	0.0004	3.510	0.1296	0.33
14	3.620	0.0131	3.742	0.1570	8.35
16	5.260	0.0277	4.126	0.2105	13.14
18	6.700	0.0449	5.120	0.4022	11.16
20	8.020	0.0643	6.031	0.6574	9.78
22	9.200	0.0846	6.391	0.7823	10.82
24	10.310	0.1063	7.237	1.1359	9.36
26	11.480	0.1318	7.673	1.3538	9.73

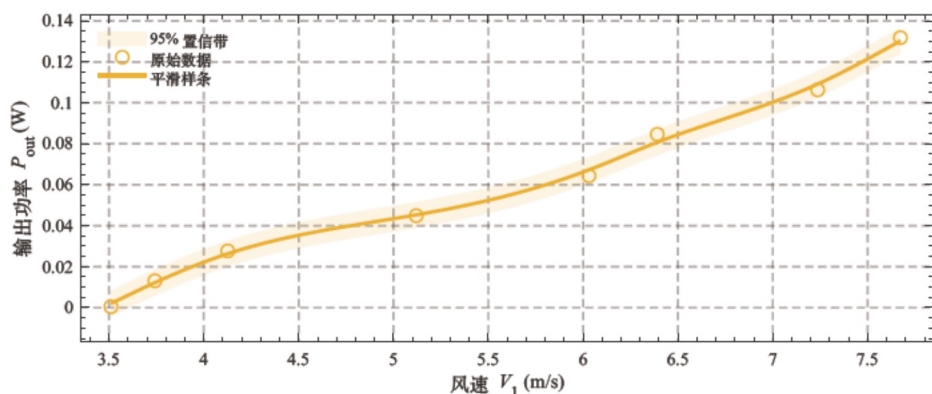


图 5：风速与风力发电机输出功率关系曲线

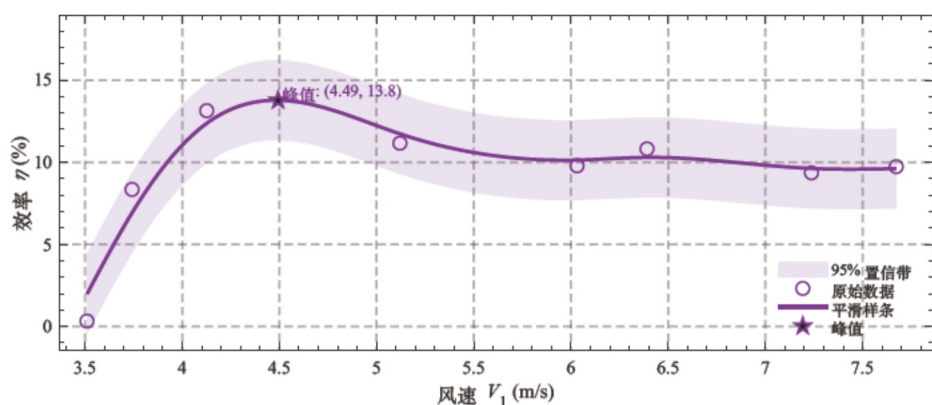


图 6：不同风速下风能到电能的转换效率

由表 4 和图 5 可知，在固定 $1000\ \Omega$ 负载条件下，风速增大时发电机输出功率整体上升。10 V 风机电压下发电机未能启动，说明此时叶片获得的气动转矩不足以克服轴承静摩擦和发电机本身的启动阻力。当风速由 $3.510\ \text{m/s}$ 增至 $7.673\ \text{m/s}$ 时，输出功率由 $0.0004\ \text{W}$ 增至 $0.1318\ \text{W}$ ，呈现明显的非线性增长趋势，这与风能功率随风速三次方增加的规律相一致。

图 6 表明，发电机转换效率并未随风速持续上升。效率在 16 V 工况下达到最大值 13.14%，之后在较高风速下约维持在 $9\% \sim 11\%$ 。其主要原因是本组实验中负载电阻保持为 $1000\ \Omega$ ，该阻值只在部分风速区间内较接近发电机的最佳负载。风速进一步增大后，固定负载不能完全匹配发电机端口特性的变化，因而虽然输出电压继续升高，输出功率相对于入射风能功率的比例反而降低。

五、 实验结论

根据以上数据处理与分析，可以得到以下结论：

- (1) 在 $10 \sim 26\ \text{V}$ 的输入电压范围内，风洞出口风速随风机输入电压增大而近似线性增大；由于风能功率与风速三次方成正比，高风速区的风能功率增长更为显著。
- (2) 风机电能到风能的转换效率在低电压区约为 20%，在较高风速下提高至约 40%，说明风机叶片在不同转速下的气动工作状态存在明显差异。
- (3) 风力发电机输出功率存在最佳负载区间，且最佳负载随风速变化而改变。固定 $1000\ \Omega$ 负载时，发电机转换效率在中等风速附近达到峰值，表明负载匹配对风能发电效率有重要影响。

六、 误差分析与改进建议

本实验的主要误差来源包括风速测量、仪器读数、环境参数取值和装置安装状态等方面。

首先，风速测量误差对结果影响较大。风能功率与 V^3 成正比，因此风速读数的微小偏差会被放大到功率计算中。本实验采用手持式风速仪在风洞出口单点测量，而实际风洞截面上的流速并非处处相同，靠近管壁处还会受到边界层影响。此外，风速仪探头本身会对局部流场产生一定阻塞和扰动，使测得风速与真实截面平均风速存在差异。

其次，电压和电流读数也会带来不确定度。风机输入电压和电流主要由稳压电源面板读数给出，在低电流工况下，相对读数误差更明显。负载电压由数字万用表测量，误差相对较小，但人工读数仍可能受到读数时刻和仪表示值波动的影响。电阻箱标称阻值与实际阻值之间的偏差也会影响输出功率的计算。

再次，空气密度在计算中被取为固定值 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 。实际空气密度与温度、气压和湿度有关，实验中未对气压进行实时测量，因此风能功率计算中仍包含环境参数近似带来的系统误差。同时，风机持续运行后温度升高，可能改变电机绕组电阻和转速稳定性；风力发电机与风洞出口若存在轻微偏心，也会降低叶片对来流动能的有效捕获。

为提高实验精度，可从以下方面改进：采用热线风速仪或皮托管进行多点扫描，并用截面平均风速计算风能功率；使用独立的高精度电压表、电流表或数据采集系统同步记录电学量；扩大负载电阻取值范围并减小步长，以更准确地确定最大功率点；在每组测量前保持风机稳定运行一段时间，并尽量保证风速仪和发电机与风洞轴线对中。通过这些改进，可以降低随机误差和系统误差，使实验结论更具可靠性。