

对旋风力机功率测量的风洞实验研究

梁 霄¹, 赵 旭¹, 周 平¹, 李 波²

(1. 西北工业大学翼型叶栅空气动力学国家级重点实验室, 西安 710072; 2. 西北工业大学明德学院, 西安 710124)

摘 要: 通过风洞对比试验, 测量同半径单级和对旋风力机在相同风速条件下的机械功率。验证单级风力机 Wilson 气动设计方法和对旋风力机气动耦合设计方法的合理性。通过变转速、变距、变级间距、变风速等方法, 获得 2 种风力机最佳机械功率曲线。结果表明, 同工况条件下实验测量的功率略低于 CFD 预测值; 在转速增加约 10% 及桨距减小约 10% 后最佳功率超过预测值。表明理论设计法较保守, 其设计的桨叶安装角再减少 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$, 叶尖速比略增大 10%, 单级和对旋风力机的功率系数尚可提高。对旋风力机启动风速略高于单级风力机, 其他风速的功率均高于单级, 功率系数达到 0.339~0.412, 提高率为 5.3%~28.9%。额定风速最佳功率系数为 0.426, 较单级功率系数 0.373, 提高率为 14.2%。

关键词: 风洞; 风力机; 测量; 功率; 对旋

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

高效利用风能, 已成为世界新能源发展和环境保护背景下的一个重要举措, 对旋风力机具有提高风力机效率、稳定性、风场利用率和结构紧凑性, 低塔架扭矩、叶片尺寸与载荷和发电成本等优势, 成为风力发电的研究热点之一。对旋风力机主要分为 2 种类型: 1) 两级通过齿轮箱驱动一台电机, 电机安装在不同的塔架上; 2) 两级直接驱动内外转子电机, 结构简单紧凑。前者已开发出 1 MW 产品^[1], 后者潜力更大, 随着双转子电机技术发展会日趋成熟。

根据 Betz 理论, 单级和对旋风力机的最大功率系数是 59% 和 64%^[2,3]。虽然叶片占风力机成本的 15%~20%^[4], 但对旋风力机启动风速小^[5], 在低转速效率较高^[6]。风场测试表明对旋风力机比单级风力机额外获得 20%~30% 能量^[6], 风洞试验发现对旋风力机比单级的功率提高 60%^[7]、40%~100%^[8]。有关计算表明对旋风力机年能量输出提高 43.5%^[9], 最大功率系数较单级的高出 30%^[10], 可见增加一级叶片所带来的回报率显著, 尤其是风轮或风场面积受限, 安装塔架成本较高等场合。

对旋和单级风力机的对比实验结果^[5-8]差异较大, 主要因对旋风轮设计不同所导致。由广泛使用的单级风轮叶片正反装构造, 仅调节各级桨距和转速不能获得对旋风力机最佳特性。桨叶气动耦合设计方法^[11]奠定了对旋风轮机功率最佳匹配的基础, 采用此法获得的对旋风力机模型与采用 Wilson 气动设计方法^[12]获得的单级风力机同半径模型的风洞实验进行对比, 可验证设计理论, 建立同一基准, 精细量化风力机性能。

1 实验设备与方法

1.1 风洞与风力机模型

采用西北工业大学翼型叶栅国家重点实验室的低速气动声学风洞。该风洞是一座回流式开口风洞, 开口试验段位于驻室内 (横截面积为 $3.43 \times 3.83 \text{ m}$), 实验段入口和出口横截面均为 $\Phi 1.5 \text{ m}$ 的圆形, 实验段长度 1.9 m, 最大风速 45 m/s, 风洞湍流度 $\hat{I} \leq 0.02\%$ 。

对旋风力机模型如图 1 所示。前、后级风轮反向转动, 分别驱动实心轴和空心轴, 带动 2 台发电机。两轴中间设有轴承, 链轮连接空心轴, 将转动

收稿日期: 2016-11-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(310201401JCQ01019)

通信作者: 赵 旭(1974—), 女, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事流体机械、CFD 及风力发电方面的研究。xuzhao@nwpu.edu.cn

传递给后级轴。级间距通过定位孔来调节。双电机保证了两级转速独立变化,便于捕捉最佳功率。实心轴连接编码器,将旋转信号转换成电平信号,触发 PIV 设备,测量流场。

前后级桨叶均为 3 片半径 0.55 m 的木质模型,由截面为 NACA4412 翼型通过气耦合设计方法^[11]获得。由于采用 Wilson 方法^[12]设计的单级风力机桨叶与对旋风力机后级桨叶形状十分接近,因此单级风力机桨叶采用后级桨叶替代,但采用单级的安装角。桨叶外形参数见表 1。

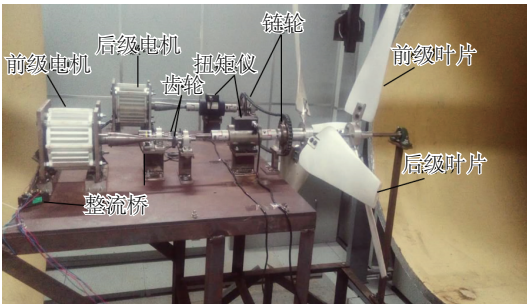


图1 对旋风力机实验模型

Fig. 1 Contra-rotating wind turbine experiment model

表1 风力机桨叶设计结果

Table 1 Wind turbine blade design results

叶高 r/R	单级		对旋			
	安装角 $\theta/(^{\circ})$	弦长 c/mm	前级		后级	
			安装角 $\theta/(^{\circ})$	弦长 c/mm	安装角 $\theta/(^{\circ})$	弦长 c/mm
0.15	45.40	1318.00	45.29	136.26	-47.10	131.00
0.20	32.80	198.60	41.06	141.49	-35.29	202.90
0.30	25.76	199.70	32.98	139.00	-27.84	205.80
0.40	20.53	184.70	26.31	131.77	-21.75	181.70
0.50	16.57	166.10	21.56	177.66	-17.63	162.10
0.60	13.49	148.20	17.21	105.65	-14.53	143.50
0.70	10.98	132.10	14.83	93.65	11.43	127.40
0.80	8.83	117.00	11.92	86.44	-7.36	113.90
0.90	6.44	101.90	9.44	74.07	-4.02	101.90
1.00	5.17	87.49	7.47	64.17	-3.46	87.49

电机均选用包头天隆永磁电机制造有限责任公司生产的发电机,前级发电机额定功率 300 W,转速 400 r/min。后级额定功率 200 W,转速 400 r/min。由于前级风轮设计转速 730 r/min,经过传动比为 2:1 的齿轮驱动前级电机。测量单级风力机时,将后级桨叶安装在前级轮毂上,驱动前级发电机。

测量系统:扭矩测量采用 2 台北京龙鼎金陆测控技术有限公司生产 LD-08D 型动态扭矩传感器,量程为 10 N·m,精度 0.5 级。连接扭矩功率仪,可读出扭矩、转速和功率 3 个参数。两级电机输出的交流电通过 2 台 FUJI 牌的 6RI100G-120 型整流桥整流为直流电,再连接滑线式变阻器,调节电阻可控制电机转速。采用数字万用电表测量电阻器的电压和电流,通过换算,可获得发电机电功率。桨叶安装角测量采用数字角度仪,精度为 0.1°。

2 功率特性测量

机械功率 P 为扭矩 M 与转速 Ω 的乘积,风力机的机械功率系数 C_p 见式(1):

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho\pi R^2 V^3} \tag{1}$$

式中, R ——风轮半径; ρ ——实验时的空气密度。

对旋风力机的前后级均以整机前无限远处来流速度 V 为基准,因此总功率系数为二者叠加,即 $C_{PC} = C_{PF} + C_{PR}$,下标 C、F、R 分别代表对旋风力机及对旋风力机的前后级。

根据叶尖速比的定义 $\lambda = \Omega R / V$,对旋风力机前后级均以 V 为参考,因二者反转,总叶尖速比为前后级叶尖速比的叠加,即 $\lambda_c = \lambda_F + \lambda_R$,转速叠加类同。

实验段位于驻室内,以风轮扫掠面积为基准,实验段的堵塞率为 7.23%。因为是开口试验段,所以不需动壁修正^[13]。实验时空气温度为 21.5 °C,大气压为 95.74 kPa。

2.1 单级风力机功率特性测量

2.1.1 额定状态测量

单级风力机额定状态设计结果:风速 14 m/s,转速 730 r/min ($\lambda = 3$),叶片根部安装角 45.5°。数值模拟^[14]预测的机械功率为 500 W,功率系数为 0.320。数值方法同文献[11],采用商业软件 NUMECA 对 N-S 方程进行离散,定常流动单通道模型,径向、切向、轴向的计算域为 $[0, 5R] \times [0, 2/3\pi] \times [-3R, 7R]$,划分结构网格,壁面 y^+ 不大于 10,网格总数约 150 万。边界条件为:进口为轴向速度,出口为大气压,周期边界,转动区设置反向的转速,转动区域交接面采用周向通量守恒型。空间离散采用中心差分格式, S-A 湍流模型,不可压缩气体模型,多重网格加速收敛。当桨叶力矩不再随迭代次数变化时,输出力矩,计算功率。

该风速和安装角状态下,改变负载调节转速,测量机械功率 P 与转速 Ω 曲线,功率系数 C_p - λ 特性曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,功率随着转速下降而增加。转速下降对应变阻器电阻变小。实际测量时,曲线最左端,电阻已达到 0.5 Ω ,发电机接近短路,因此不能再降低转速,所以获得的是 P - Ω 曲线的下降段,以下同。常规 P - Ω 曲线左边还有上升段,如果采用输出电压更大的发电机(实验发电机的输出电压为 28 V),可测出上升段。图 2 显示,在设计转速为 730 r/min ($\lambda = 3$)时,功率为 425 W,功率系数为 0.271。当转速为 693 r/min ($\lambda = 2.85$)时,最大功率为 430 W,功率系数为 0.275。

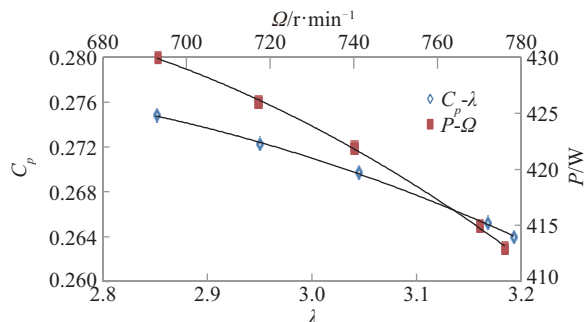


图2 单级额定状态下功率特性曲线

Fig. 2 Power performance curve of single wind turbine under rated condition

对比设计转速下数值模拟预测的功率(500 W)和系数(0.320),实验获得的同转速下的功率(425 W)和功率系数(0.271),以及不同转速下最大功率(430 W)和系数(0.275)略小,这是因为台架等物对流场的干扰以及轴承和齿轮等摩擦等因素,而数值模型存在较多假设,不考虑对流场干扰和机械损失,导致能量利用率偏高。

2.1.2 变安装角测量

额定风速下,以额定状态的安装角(根部 45°)作为基准,改变安装角,得到不同安装角下的 C_p - λ 特性曲线,如图 3 所示,图中标出根部安装角,本文测试的变安装角均以根部为基准,根部安装角简称为安装角,下文同。由于部分实验数据分布不光滑,在绘制曲线时,采用二次多项式拟合,以下同。

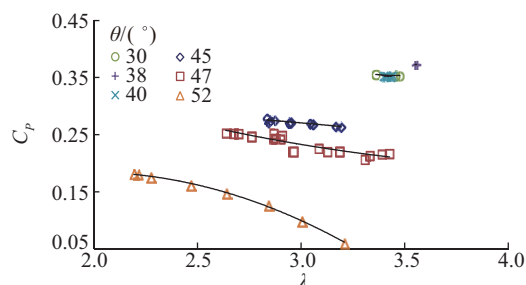


图3 单级变安装角的 C_p - λ 曲线

Fig. 3 C_p - λ curve of single wind turbine for different blade installation angles

从图 3 可知,随叶尖速比增加,各安装角对应的 C_p 均下降。如 2.1.1 节解释,由于接近短路,无法进一步降低转速,曲线均获得下降段,可认为最大功率系数位于下降段的最左边。各曲线最右端,受到木制桨叶强度限制,最大转速约为 800 r/min。图 3 显示,随着安装角减少,风力机最大 C_p 先增大(38°时达到最大值 0.373)后减小。考虑 38°安装角的负载电阻调节范围小,电机趋于短路,故选择 40°为最佳安装角(对应最佳 $C_p = 0.353$ 已超过设计值 0.320)。可见,设计安装角减小 5°,叶尖速比由 3.0 升至 3.4,可获得更高的功率系数 $C_p = 0.353$ 。

2.1.3 变风速测量

选取最佳安装角 40°,逐渐增加风速,依照文献^[13],测得单级风力机的启动风速为 5.8 m/s,启动扭矩为 0.278 Nm。绘制其他风速下(6~14 m/s)风力机机械功率转速曲线,连接各风速下 P - Ω 曲线的极值点,得到风力机输出功率特性曲线,见图 4。从图 4 可

知,风速越大,最佳功率对应的转速越大。风速为 6、8、10、12 和 14 m/s 时,单级风力机最高机械功率为 41、94、175、309 和 554 W。最后一组的功率已经超过了设计值(500 W)。

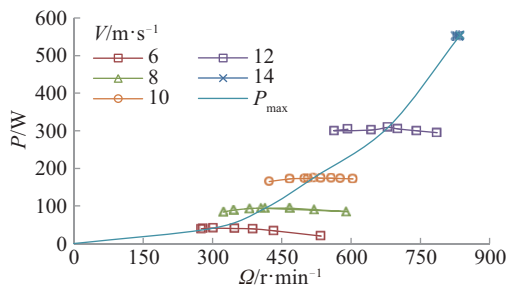


图4 单级风力机变风速 P - Ω 曲线

Fig. 4 P - Ω curve of single wind turbine under various free stream velocities

将功率利用公式(1)换算成功率系数后,发现 6~12 m/s 风速下风力机最佳功率系数在 0.30~0.33 之间,对应的叶尖速比 λ 在 3.0~4.0 之间。风速 14 m/s,最佳功率系数达到 0.353,超过了设计值(0.320)。相比于文献[15]中的小型风力机的实验结果(C_p 约为 0.2~0.3 之间),本文的单级风力机具有较高的气动性能。这是因为风力机越小,受叶尖三维流动影响和叶片绕流雷诺数较小等原因,导致气动性能降低,而机械损失较大,因此机械功率系数越小。

2.2 对旋风力机功率特性测量

2.2.1 额定状态测量

额定状态设计结果:风速 14 m/s,前级桨叶根部安装角 θ_F 为 45° ,转速 730 r/min($\lambda_F=3$),后级根部安装角 θ_R 绝对值为 47° (因方向与前级叶片相反,所以表 1 中为负值,下文表述均采用绝对值),转速为 438 r/min($\lambda_R=1.8$), $\lambda_c=4.8$ 。耦合设计理论中^[11]不涉及级间距,因此数值模拟任选一个间距 220 mm。需要说明的是,设计时后级叶尖速比是以后级前来流速度为基准(对应值 3),因此叶片数取 3,等效为以前级前来流为基准的叶尖速比 1.8。数值预测前后级的功率分别为 322 和 300 W,总功率为 622 W,功率系数分别为 0.206 和 0.190,总系数 0.396。

先验证设计工况,调节负载电阻 R_F 和 R_R ,改变两级的转速,获得功率与转速曲线,如图 5 所示,图中加入 2.1.1 节中单级风力机额定状态性能曲线

P_s ,方便比较。

由图 5 可见,对照额定状态,实验获得的对旋风力机前后级功率分别为 313 和 220 W。均小于数值结果(321.8 和 299.7 W),原因同 2.1.1 节中解释。图 5 显示对旋前级功率大于后级功率,二者均小于单级功率,但总功率最佳值(534 W)大于单级测试最佳值(436 W)。对旋风力机最大功率对应的前后级转速分别为 671 和 431 r/min,较设计转速(730 和 438 r/min)均减小。换算成功率系数后发现,对旋风力机最大总功率系数为 0.333,较单级最大功率系数 0.275 提高约 21.1%, $\lambda_c=4.25$ 略小于设计值 4.8。

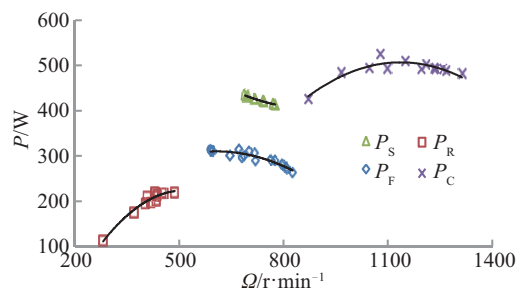


图5 对旋和单级风力机额定状态 P - Ω 曲线

Fig. 5 P - Ω curve of single and contra-rotating wind turbines under rated conditions

2.2.2 变安装角测量

分为 3 组实验:1)单独变前级根部安装角 θ_F (范围 $30^\circ \sim 50^\circ$),后级根部安装角 θ_R 保持 47° 不变;2)单独变后级 θ_R (范围 $37^\circ \sim 47^\circ$),前级 θ_F 保持 35° 不变;3)前后级安装角都改变。依次获得的对旋风力机 C_p - λ 特性曲线见图 6~图 8。

图 6 显示,最大 C_p 随前级安装角的减小先增大后减小,在 $\theta_F=35^\circ$ 达到最大。因此第二组实验方案为固定前级安装角为 35° ,改变后级安装角。

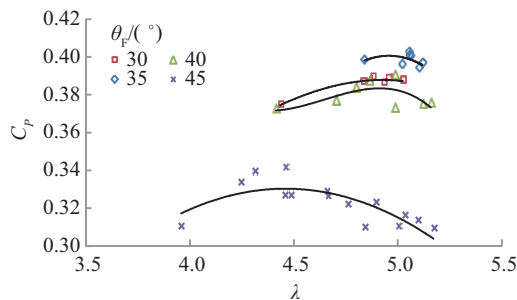


图6 对旋风力机 C_p - λ 曲线($\theta_R=47^\circ$)

Fig. 6 C_p - λ curve of contra-rotating wind turbine($\theta_R=47^\circ$)

图 7 显示,最大 C_p 随后级安装角增加先增加后减小,在 θ_R 为 42° 达到最大。

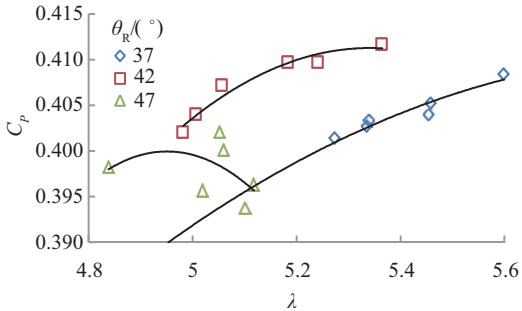


图 7 对旋风力机 C_p - λ 曲线 ($\theta_f=35^\circ$)

Fig. 7 C_p - λ curve of contra-rotating wind turbine ($\theta_f=35^\circ$)

图 8 显示,在测试的安装角范围内,对旋风力机最大功率系数(0.412)超过 2.1.2 节中的单级最大值(0.373),对应安装角为 35° 和 42° 。

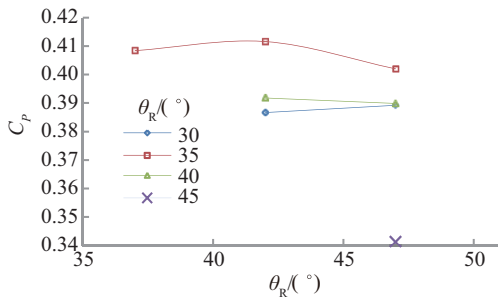


图 8 对旋风力机 C_p - λ 曲线(变安装角)

Fig. 8 C_p - λ curve of contra-rotating wind turbine (various installation angles)

2.2.3 变级间距测量

实心轴轮毂的定位螺栓设计 3 个位置,分别对应级间距 H 为 200.0、275.0 和 328.5 mm ($H/D=0.2000$ 、0.2500 和 0.3285)。在额定风速情况下,调节两级转速,测量级间距对前、后级和对旋风力机的 C_p - λ 特性影响,如图 9~图 11 所示。

图 9 显示,级间距增加,前级功率系数曲线向右上方移动,在级间距为 328.5 mm 时,最大 $C_{PF}=0.357$,较级间距 200 mm 的最大 C_{PF} (0.325) 提高了约 9.85%;表明后级对前级流动的遮挡减弱。

图 10 显示,级间距增加,后级功率系数向下方移动,数值(0.068~0.096)显著低于前级值(0.309~0.357)。表明由于前级风能利用率增高,后级风能利用率减小。因为前级对风能的吸收是有限的,故当级间距达到一定程度时,前级吸收的风能达到饱

和,留给后级的风能将不会再减小,所以级间距 200 和 328.5 mm 的风力机特性差异很小。

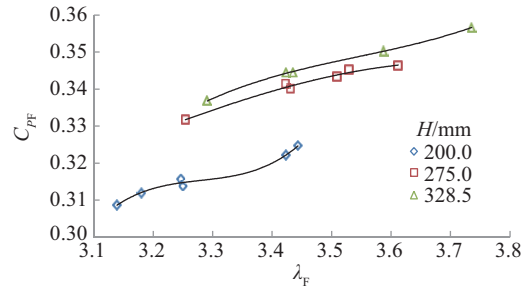


图 9 级间距对对旋风力机前级 C_{PF} - λ_F 曲线影响

Fig. 9 Stage distance influence on C_{PF} - λ_F curve of front rotor

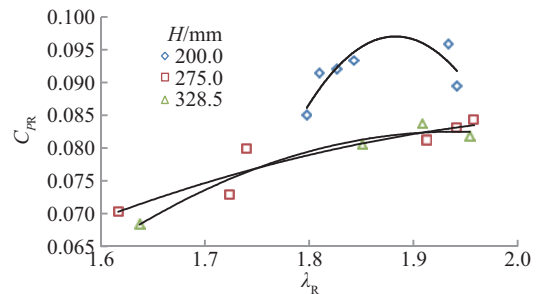


图 10 级间距对对旋风力机后级 C_{PR} - λ_R 曲线影响

Fig. 10 Stage distance influence on C_{PR} - λ_R curve of rear rotor

图 11 显示,级间距增加,对旋风力机 C_{PC} 曲线向右上方移动,在间距为 328.5 mm 时,达到最大值 0.426。3 种级间距对应的最大功率系数变化较小,在 0.412~0.426 范围,相对误差约 3.4%。级间距对功率的影响较小,有利于 MW 级风力机采用间距较小的对旋技术。因为间距增加,两级相互干扰减弱,前级功率占总功率的 70%~100%,其增加占主导地位。对旋风力机最大功率系数(0.426)较单级风力机最大值(0.373)提高了 14.2%。

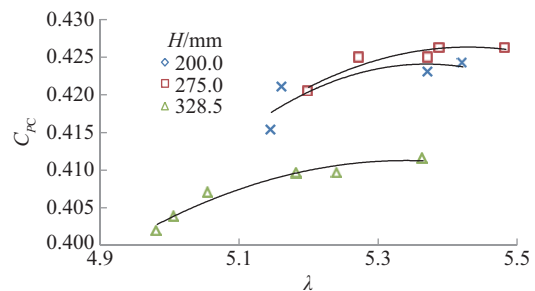


图 11 级间距对对旋风力机 C_{PC} - λ 特性曲线的影响

Fig. 11 Stage distance influence on the C_{PC} - λ curve of contra-rotating wind turbine

2.2.4 变风速测量

由 2.2.2 节和 2.2.3 节的结果,可获得对旋风力机最佳安装角($35^\circ, 42^\circ$), $H=328.5$ mm。但考虑 PIV 测量范围(300×300 mm)应覆盖两级桨叶叶梢区域,故采用 200 mm 的级间距进行变风速测量。

测出对旋风力机的启动风速 7.5 m/s,启动扭矩 0.932 Nm。对比 2.1.3 节单级风力机结果,对旋风力机启动风速和启动扭矩均大于单级。这与文献[5]测得对旋风力机启动风速小于单级结论不同。分析其原因,文献[5]的对旋风力机与本文构造不同,前级风轮小(半径为 $0.6R$),叶片多(3~6 个),后级风轮大(半径为 R),叶片少(2~3 个),两级直接连接内外转子发电机。对比单独后级风轮带动风力机,发现对旋启动风速小,这是因为小风轮实度大,易启动。而本文前后级均为 3 叶片同半径风轮,后级对前级风轮绕流的阻挡较强,导致对旋风力机启动风速大。本文采用 2 台独立的发电机,链轮、轴承等机械摩擦影响较大也是原因之一。

调节两级转速,绘制其他风速下(8~14 m/s)风力机机械功率转速曲线,连接各风速下 $P-\Omega$ 曲线的极值点,得到对旋风力机输出功率特性曲线,见图 12。由图 12 可知,随风速增加,对旋风力机最佳功率对应转速增加。风速为 8、10、12 和 14 m/s 时,对旋风力机最高机械功率为 99、214、398 和 641 W,较单级最佳功率(见 2.1.3 节)依次提高 5.3%、22.3%、28.8%和 15.7%。额定状态下的最大功率已经超过设计值(622 W)。

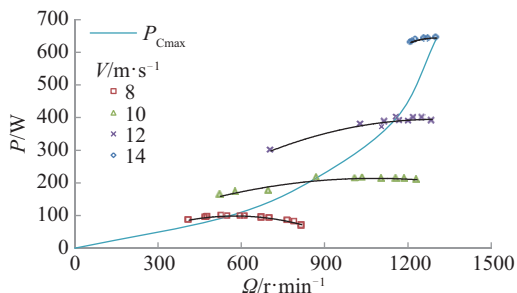


图 12 对旋风力机变风速 $P-\Omega$ 曲线

Fig. 12 $P-\Omega$ curve of contra-rotating wind turbine under various free stream velocities

对比单级和对旋风力机不同风速下的最佳 C_p 点,如图 13 所示。单级的启动风速为 5.8 m/s,低于对旋的启动风速,但对旋在各个风速下的 C_p 均大于

单级,在风速 8、10、12 和 14 m/s 时,对旋风力机的机械功率系数分别为 0.339、0.379、0.405 和 0.412,比单级功率系数提高的绝对值分别为 0.017、0.072、0.091 和 0.058。相比于文献[15]中的小型对旋风力机的实验结果(最大 $C_p=0.310$),本文的对旋风力机具有较高的气动性能。

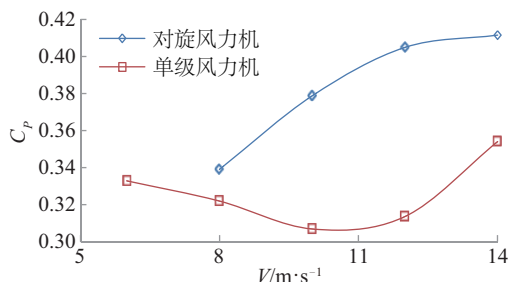


图 13 对旋、单级风力机变风速最佳特性曲线

Fig. 13 Optimal performance curve of single and contra-rotating wind turbines under various free stream velocities

分析对旋风力机不同风速下的前后级功率系数,可发现,前级功率系数占对旋总系数的 70%~100%。在来流风速达到 12 m/s 时,后级才开始转动,其功率系数约 0.1。可见对旋前级风轮性能是影响对旋风力机总性能的主要因素。

3 结 论

对比单级和对旋风力机实验结果可得到以下结论:

1)设计风速、转速和安装角条件下的单级和对旋风力机功率系数测量值(0.275 和 0.333)比 CFD 预测值(0.320 和 0.396)略小,这是由于真实流动和机械损失导致。

2)额定风速下,单级风力机最佳功率系数测量值为 0.373, $\lambda=3.56$,根部安装角 47° ,较设计的功率系数(0.320)高,安装角(45°)小,叶尖速比(3.0)大。

3)额定风速下,对旋风力机最佳功率系数测量值为 0.412, $\lambda=5.36$,根部安装角($35^\circ, 42^\circ$),较设计的功率系数(0.396)大,安装角($45^\circ, 47^\circ$)小,叶尖速比(4.8)大。

4)级间距 $H/D=0.2\sim 0.3$ 的测试表明,级间距对对旋功率系数的影响较小。间距增加,级间干扰减小,对旋风力机和前级的最佳功率系数增加。验证

了耦合设计中不包含级间距的方法的合理性。

5) 本实验构造的对旋风力机启动风速和启动扭矩均大于单级风力机。

6) 在 8~14 m/s 风速下, 对旋风力机最佳功率系数均高于单级, 提高相对值为 5.3%~28.9%, 除 8 m/s 提高率略低(5.3%)外, 其他风速提高率均为 16.4%~28.9%。接近文献[6]的测试结果(20%~30%)。

[参考文献]

- [1] No T S, Kim J-E, Moon J H, et al. Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(10): 2124—2132.
- [2] Newman B G. Actuator-disc theory for vertical-axis wind turbines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 15(1): 347—355.
- [3] Newman B G. Multiple actuator-disc theory for wind turbines[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1986, 24(3): 215—225.
- [4] Jureczko M, Pawlak M, Mezyk A. Optimisation of wind turbine blades[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167: 463—471.
- [5] Ushiyama I, Shimota T, Miura Y. An experimental study of the two-staged wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 1996, 9(1-4): 909—912.
- [6] Appa K. Counter rotating wind turbine system [R]. Energy Innovation Small Grant (EISG) Final Report, 2002: 1—40.
- [7] Habas R W Y, Groza V, Guillemette P. Performance optimization of dual-rotor wind turbine system[A]. *IEEE Electrical Power & Energy Conference [C]*, Halifax, NS, Canada, 2010.
- [8] Habash R W Y, Groza V, Yang Y, et al. Performance of a contrarotating small wind energy converter [J]. *ISRN Mechanical Engineering*, 2011, DOI: 10.5402/2011/828739.
- [9] Shen Wenzhong, Zakkam V A K, Sørensen J N, et al. Analysis of counterrotating wind turbines [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2007, 75(1): 012003.
- [10] Lee Seungmin, Kim Hogeon, Son Eunkuk, et al. Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2012, 42: 140—144.
- [11] 高 深, 赵 旭, 杨 光, 等. 对旋风力机气动耦合设计[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(6): 1468—1474.
- [11] Gao Shen, Zhao Xu, Yang Guang, et al. Coupled aerodynamic design method for counter-rotating wind turbines [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2017, 38(6): 1468—1474.
- [12] 赵丹平, 徐宝清. 风力机设计理论及方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [12] Zhao Danping, Xu Baoqing. Wind turbine design theory and method [M]. Beijing: Beijing University Press, 2012.
- [13] 小型风力发电机风洞测试要求[R]. 中国空气动力研究与发展中心(征求意见稿), 2006.
- [13] Wind tunnel test required of minitype wind powered generator [R]. China Aerodynamics Research and Development Center(draft for comment), 2006.
- [14] 高 深. 对旋风力机气动设计和数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [14] Gao Shen. Aerodynamic design and numerical simulation of contra-rotating wind turbines [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [15] Usui Yuta, Kubo Koichi, Kanemoto Toshiaki. Intelligent wind power unit with tandem wind rotors and armatures (optimization of front blade profile) [J]. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2012, 6: 1791—1799.

POWER MEASUREMENT OF CONTRA-ROTATING WIND TURBINE IN WIND TUNNEL

Liang Xiao¹, Zhao Xu¹, Zhou Ping¹, Li Bo²

(1. *National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*; 2. *Mingde College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710124, China*)

Abstract: This paper presents the comparison of mechanical power measurement for traditional and contra-rotating wind turbines for identical radius under same free stream velocity in wind tunnel. In order to validate the Wilson design method for single turbine and the coupled aerodynamic design method for contra-rotating wind turbines, the rotating speed, pitch angle, stage distance and free stream velocity are varied to capture the maximum mechanical power. The results indicate that the measured experimental power is slightly smaller than CFD prediction under same working conditions. However, 10% reduction of pitch angles, that is 5° - 10° in range and 10% raise of tip speed ratio from theoretical design helps to improve performance of both turbines. The maximum power captured in experiment is bigger than CFD prediction. Except for higher start-up wind speed, contra-rotating wind turbine achieves higher power coefficient than that of single turbine in all wind speed tested. The absolute power coefficient is 0.339-0.412, with rise ratio 5.3%-28.9%. At rated condition, the maximum power coefficient of contra-rotating turbine and single turbines are 0.426 and 0.373, and the riseratio is 16.4%.

Keywords: wind tunnels; wind turbines; measurement; power; contra-rotating