



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

浓缩风能型 风电机组理论研究

NONGSUO FENG NENG XING
FENG DIAN JI ZU LI LUN YAN JIU

田德 韩巧丽 林俊杰 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



“十二五” “十三五” 国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

浓缩风能型 风电机组理论研究

田德 韩巧丽 林俊杰 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，介绍了浓缩风能理论和浓缩风能型风电机组发展历程、关键技术研究开发与应用，主要包括三部分内容：浓缩风能型风电机组基础理论与发展历程，浓缩风能型风电机组关键技术研究开发，浓缩风能型风电机组技术应用示范与噪声、材料、提水系统方面的研究。书中重点介绍了浓缩风能型风电机组基础理论研究、设计方法、风洞实验、车载实验和系统仿真实验。

本书可作为高等院校风电相关专业的研究生以及风电相关行业科研院所工作人员的参考书，也可供机械工业部门、电气工业部门和其他工业部门相关设计人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

浓缩风能型风电机组理论研究 / 田德等著. -- 北京：
中国水利水电出版社，2017.3
（风力发电工程技术丛书）
ISBN 978-7-5170-5503-7

I. ①浓… II. ①田… III. ①风力发电机—发电机组
—研究 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第127122号

书 名	风力发电工程技术丛书 浓缩风能型风电机组理论研究 NONGSUO FENGNE NG XING FENGDI AN JIZU LILUN YANJIU
作 者	田德 韩巧丽 林俊杰 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.75印张 445千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	88.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编委会

顾问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主任 徐辉 毕亚雄

副主任 汤鑫华 陈星莺 李靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘丰

刘玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙强 孙志禹

李炜 李莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈刚 陈澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施蓓 洪树蒙

祝立群 袁越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡新 糜又晚

丛书主编 郑源 张燎军

丛书总策划 李莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司

本书编委会

主 编 田 德

副 主 编 韩巧丽 林俊杰

参编人员 马广兴 姬忠涛 习明光 季 田

康丽霞 辛海升 张春莲



前言

风能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的关注,已经成为现代能源系统中的主要组成部分之一。为了降低风能的波动性和提高风能密度,经过大量的科学实验研究,在国际上提出浓缩风能理论,研制出浓缩风能型风电机组样机,获得了中国发明专利(专利号:ZL201510163513.9)和实用新型专利(专利号:ZL94244155.9)。与普通型同等级功率的风电机组相比,浓缩风能型风电机组将低密度的风能通过浓缩风能装置进行加速、整流和均匀化后,驱动风轮旋转发电;因此,机组启动风速低、风轮直径小、输出功率大,风轮承受的流体能切变小,风轮与传动链承受的载荷波动小,机组运行平稳、安全性高、噪声低、电能质量高、寿命长,机组年发电量大。开展浓缩风能型风电机组理论与技术研究对规模化开发利用低品位风能资源、增强风电行业产品竞争力、提高经济效益和生态环保效益意义深远。

全书共7章,第1章介绍了浓缩风能型风电机组的基本概况与发展历程;第2章介绍了浓缩风能型风电机组的工作原理、组成与特点以及低速永磁发电机和控制系统的設計方法;第3章介绍了浓缩风能型风电机组自然风场测试与风洞实验研究;第4章介绍了浓缩风能型风电机组车载实验研究;第5章介绍了浓缩风能型风电机组系统建模仿真研究;第6章阐述了浓缩风能型风电机组技术应用示范;第7章介绍了浓缩风能型风电机组的噪声、材料和提水系统研究。

本书内容涵盖了浓缩风能基础理论研究、特性实验与设计方法;分别对浓缩风能型风电机组的整体模型、系列化叶轮和风切变条件下的浓缩风能装置进行了风洞实验对比分析,并且对螺旋桨式风轮、浓缩风能型风电机组模型和浓缩风能装置进行车载实验,结合建模仿真实验结果研究分析了浓缩风能型风电机组特性。阐述了浓缩风能型风电机组的应用示范,对典型的浓缩

风能型风电机组特性进行了对比分析,为浓缩风能型风电机组的大型化、系列化发展奠定了理论基础。

本书的完成首先要感谢国家自然科学基金资助项目《浓缩风能型风力发电机的整体模型风洞实验》(59306060)、国家自然科学基金资助项目《浓缩风能型风力发电机形体流场自迎风控制系统的研究》(59566001)、国家自然科学基金资助项目《浓缩风能型风力发电机叶轮系列化的风洞实验与研究》(59776033)、国家教委留学回国人员资助项目《明星式风力发电装置的研究》(教留司研[1993] 360号)、科技部科技攻关项目(西部新能源行动计划)《1000W浓缩式离网型风力发电机组试点示范》([2003] 国科高函字 67号)、内蒙古自治区科委科技攻关项目《200W浓缩风能型风力发电机的研制》(95-01-17)、内蒙古自治区“321人才工程”人选科技活动资助项目《600W浓缩风能型风力发电机的研制》(内人专字[1999] 51号)、内蒙古自治区工业科技攻关项目《新型(600~1000W)风力发电机的研制》(内科发新字[2001] 39号)、内蒙古高等教育“111”人才工程项目《特种风力发电机的研究》(内教高字[2001] 9号)、内蒙古自治区人事厅人才开发基金项目《生态环境建设用移动式浓缩风能型风光发电站的实验研究》(内人专字[2002] 45号)、内蒙古自治区科技攻关项目《户用风光互补发电与泵水系统研究开发》(内科发新字[2003] 33号)、内蒙古自治区财政厅项目《风光互补发电系统在京津风沙源区工程中的应用研究》(内财建[2004] 804号)、内蒙古自治区科技计划项目《1kW浓缩风能型风光互补发电系统的示范推广》(KJT2005-GXZHB02)的资助。如果没有这些项目的资助,作者将无法开展浓缩风能型风电机组理论研究工作。同时感谢在作者所在团队里工作过的郭凤祥、刘树民、王海宽、黄顺成、陈松利、高宏中、王永维、孔令军、赵慧欣、张文瑞、王利俊、徐丽娜、盖晓玲、亢燕茹、陈忠雷、毛晓娥、钱家骥、罗涛、闫肖蒙,他们多年来在团队里辛勤工作取得的研究成果,对本书的完成作出了重要贡献。

尽管作者慎之又慎,但由于水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

田德

2017年6月于华北电力大学

符 号 表

b ——长方形断面的横向幅度, m

D_1 ——转动箱直径, m

D_2 ——固定翼箱外径, m

d ——风力机翼直径, m

F ——通道断面面积, m^2

g ——重力加速度, $9.80665m/s^2$

l ——轴向长度, m

C_p ——压力系数

$2\varphi_0$ ——圆锥扩压管扩大角

m ——流体平均深度, m

p ——压力, Pa

Re ——雷诺 (Reynolds) 数

v ——速度, m/s

W ——风电机组输出功率, kW 或 MW

r ——空气单位体积的重量, $r=p/g$, kgf/m^3

η ——效率

θ ——换算成圆形断面扩散管的扩散角, ($^\circ$)

ξ ——系数

ρ ——空气密度, kg/m^3

B ——机组黏摩擦阻尼系数

B_t ——风电机组黏滞阻力系数

C ——蓄电池可用电荷容量与总电量的比值

i_{AC} ——交流电流

i_d ——电流在 d 轴的分量

I_{DC} ——直流电流

I_{dmax} ——蓄电池最大可放电电流

i_{dref} ——电流在 d 轴分量参考值

i_q ——电流在 q 轴分量

J ——风力机转动惯量

J_g ——风电机组转动惯量

k ——蓄电池比率常数

q_0 ——蓄电池在时间步长 Δt 起始时刻总电荷容量, $A \cdot h$

q_{10} ——蓄电池在时间步长 Δt 起始时刻可用电荷容量, $A \cdot h$

$q_{\max}$ ——蓄电池最大容量, $A \cdot h$

T_f ——风轮气动转矩

T_g ——发电机电磁转矩

T_m ——风轮轴阻力矩

U_d ——电压在 d 轴分量

U_q ——电压在 q 轴分量

v ——风速

U_{AC} ——交流电压

U_{DC} ——直流电压

U_g ——发电机定子电压

λ ——叶尖速比

ω ——风轮角频率

ω_g ——风电机组角频率

$\Delta\omega$ ——风轮角加速度

下角标 1~5——各断面的值 (例如: 12 表示断面 1 和断面 2 之间的值)



前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 浓缩风能型风电机组	1
1.2 浓缩风能型风电机组发展历程	3
1.2.1 早期结构	3
1.2.2 中期结构	9
1.2.3 目前结构	10
第 2 章 浓缩风能型风电机组	11
2.1 浓缩风能理论	11
2.1.1 浓缩风能原理	11
2.1.2 浓缩风能型风电机组工作原理	13
2.1.3 浓缩风能型风电机组中央流路的流场特性	15
2.2 浓缩风能型风电机组的组成与特点	16
2.2.1 结构与计算公式	16
2.2.2 浓缩风能型风电机组能量转换理论分析	17
2.2.3 浓缩风能型风电机组特点	18
2.3 低速永磁发电机	19
2.3.1 设计概述	19
2.3.2 技术要求	20
2.3.3 风力发电专用低转速稀土永磁发电机的结构设计分析	20
2.3.4 电磁理论设计与分析	23
2.3.5 性能实验	26
2.3.6 结论	34
2.4 控制系统	35
2.4.1 迎风及限速自动控制系统	35

2.4.2	基于单片机的迎风调向控制系统	40
2.4.3	基于 PLC 的迎风控制系统	45
第 3 章	浓缩风能型风电机组自然风场测试与风洞实验研究	48
3.1	自然风场测试实验	48
3.1.1	实验设备	48
3.1.2	自然风场风速分布测试	48
3.1.3	自然风场风速对比结果与分布规律分析	48
3.2	风洞实验	51
3.2.1	MCWET 系列模型风洞实验	51
3.2.2	600W 浓缩风能型风电机组风轮风洞实验	101
3.2.3	风切变下浓缩风能型风电机组浓缩装置的流场风洞实验	112
第 4 章	浓缩风能型风电机组车载实验研究	133
4.1	浓缩风能型风电机组螺旋桨式风轮的实验研究	133
4.1.1	螺旋桨式风轮的设计方法	133
4.1.2	浓缩风能型风电机组螺旋桨式风轮的实验及其结果分析	140
4.2	大容量浓缩风能型风电机组模型气动特性的实验研究	148
4.2.1	浓缩风能型风电机组相似模型 I 的气动特性实验研究	148
4.2.2	浓缩风能型风电机组相似模型 II 的气动特性实验研究	159
4.2.3	浓缩风能型风电机组相似模型 II 的发电功率输出特性实验研究	166
4.2.4	200W 浓缩风能型风电机组相似模型 III 的流场特性实验	172
4.3	浓缩风能装置的流场车载实验	175
4.3.1	实验内容	175
4.3.2	实验测试仪器及其参数	175
4.3.3	实验方法	176
4.3.4	实验结果与分析	177
4.3.5	实验误差分析	183
4.3.6	结论	184
第 5 章	浓缩风能型风电机组系统建模仿真研究	185
5.1	浓缩风能装置流场风切变特性实验研究	185
5.1.1	浓缩风能装置的流场仿真与实验	185
5.1.2	风切变下传统浓缩风能装置的流场仿真	190
5.1.3	风切变下浓缩风能装置改进模型 I 的流场仿真	195
5.1.4	风切变下浓缩风能装置改进模型 II 的流场仿真与实验	200
5.1.5	结论	205
5.2	浓缩风能装置流场仿真与结构优化	205
5.2.1	湍流模型对浓缩风能装置流场的影响	205

5.2.2	几何参数对浓缩风能装置流场的影响	213
5.2.3	扩散管母线形状对浓缩风能装置流场的影响	220
5.2.4	不同浓缩风能装置模型对内部流场的影响	224
5.2.5	不同增压板结构对浓缩风能装置内部流场的影响	227
5.2.6	结论	231
第 6 章	浓缩风能型风电机组技术应用示范	232
6.1	浓缩风能型风电机组的应用	232
6.1.1	安装维护	232
6.1.2	应用产品试点示范	234
6.2	典型浓缩风能型风电机组	237
6.2.1	200W 浓缩风能型风电机组	237
6.2.2	600W 浓缩风能型风电机组	238
6.2.3	典型机组对比	241
第 7 章	浓缩风能型风电机组相关技术研究	244
7.1	噪声研究	244
7.1.1	噪声的特点和危害	244
7.1.2	风力发电的噪声问题	244
7.1.3	风电机组噪声测试	245
7.1.4	浓缩风能型风电机组噪声机理的试验研究	247
7.1.5	风电机组噪声测试结果的分析	253
7.1.6	浓缩风能型风电机组的降噪方案	263
7.1.7	结论	264
7.2	浓缩风能装置材料研究	265
7.2.1	试验材料	265
7.2.2	流固耦合分析理论与模型建立	266
7.2.3	结果与分析	270
7.2.4	结论	273
7.3	浓缩风能型风电机组提水系统	274
7.3.1	浓缩风能型风力发电提水系统	274
7.3.2	系统控制策略	275
7.3.3	系统仿真建模	275
7.3.4	结论	277
7.3.5	实例应用	277
附录		278
附表 1	1kW 低转速稀土永磁发电机 I 号样机实验数据	278
附表 2	1kW 低转速稀土永磁发电机 I 号样机实验数据	278

附表 3	1kW 低转速稀土永磁发电机 II 号样机实验数据	279
附表 4	1kW 低转速稀土永磁发电机 II 号样机实验数据	280
附表 5	发电机磁路主要性能参数及其计算值	281
参考文献		282

第 1 章 绪 论

1.1 浓缩风能型风电机组

浓缩风能型风电机组是为了改善风力发电的经济性而设计的新型发电装置（已获得中华人民共和国专利，专利号：ZL94244155.99），其通过浓缩风能装置将稀薄的、非稳定的自然风浓缩加速、整流并均匀化后驱动风轮旋转发电，以提高单机输出功率和机组年运转率，在一套机组内可重叠设置几台风电机组，从而达到降低风力发电成本的目的。

浓缩风能型风电机组的设计思想是为了克服风能能量密度低这一弱点，对稀薄的风能进行浓缩利用，在浓缩风能的过程中，浓缩风能装置能有效克服风能的不稳定性，从而实现提高风电机组的效率和可靠性、降低风力发电成本的目的；其技术原理是把独特的风电机组风轮置入浓缩（增速）装置中，风轮前设增速流路，风轮后设扩散管，实现把稀薄的风能浓缩后利用的目的。浓缩风能型风电机组主要由浓缩风能装置、发电机、风轮、尾翼、回转体、塔架等部件组成，浓缩风能装置由增压圆弧板、收缩管、中央圆筒、扩散管组成，浓缩风能型风电机组部分主要结构如图 1-1 所示。

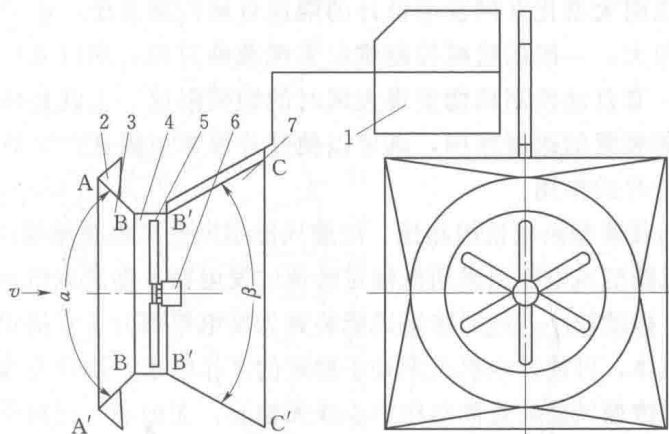


图 1-1 浓缩风能型风电机组部分主要结构

1—尾翼；2—增压圆弧板；3—收缩管；4—中央圆筒；5—风轮；6—发电机；7—扩散管

浓缩风能型风电机组具有单机输出功率大、风能利用率高、风轮直径小、切入风速低、噪声小、单位度电成本低、稳定性高、安全性高、可靠性高、年发电量大等特点，与传统风电机组相比优势明显，应用前景广阔。这种风电机组的关键技术特征如下：

（1）空气动力学方面。浓缩风能装置的设计可使自然风的流速增高、湍流度降低。当自然风流过该机组时，浓缩风能装置后方形成低压区，前方形成高压，自然风在前后压差的作用下增速，提高风能的能流密度，拓宽了风能利用的下限风速，使得机组启动风速

低；风轮所承载荷均匀性程度提高，输出功率增大，风能年利用率提高，有利于电气系统正常工作，达到增长机组寿命，提高风电机组的可靠性和降低风力发电成本等的目的。

浓缩风能型风电机组在低风速时的输出功率明显大于普通型风电机组，实验证明：某一时刻自然风的流速可增至原来的 1.36 倍以上，输出功率是普通型风电机组的 2.5 倍以上。输出功率大可以使在相同额定功率下的高速旋转部件——风轮的直径比普通型风电机组风轮直径小，因此，在相同风速载荷作用下，浓缩风能型风电机组的风轮寿命更长。

风速大小、方向频繁变化的自然风经浓缩风能装置的中央圆筒进一步整流和均匀化后驱动风轮旋转发电，降低了风能湍流度，提高了风能的品质。实验证明：在低风速段（10m/s 以下）通过浓缩风能装置的风能湍流度可降低 9%，高风速段下降会更明显。日本 200W 小型浓缩风能型示范风电机组，于 2004 年经历两次台风袭击，无损坏正常运转，这说明湍流度下降具有延长风轮及机械、电气部件寿命的实际效果。

（2）机械方面。浓缩风能型风电机组可实现自动迎风，且迎风导向性能好，机组运行更平稳。与其他类型机组相比，浓缩风能型风电机组的风轮和发电机安装在浓缩风能装置内，同尾翼一起构成机组主体，这种结构在自然风场中能够形成自动对向力矩，配合尾翼，导向灵敏度高；驱动风轮旋转的气流是经过加速、整流、均匀化的高品质风能，这减少了交变载荷对风轮的冲击，使风轮旋转时振动小，机组运行更平稳，延长了整个机组的寿命。尾翼中心线与浓缩风能装置的对称中心线无偏心且机组整体结构过渡平滑，从而使低风速导向平稳。

（3）控制方面。由形体流场分析和实践证明，浓缩风能型风电机组在空气流场中始终受迎风力矩，形体有利于自迎风导向。在此基础上的自迎风控制运转平稳，高效节能，采用为浓缩风能型风电机组大型化并网发电设计的限速自动控制系统，由于大型机组质量和体积都较大，惯性力很大，一般的机械控制难以实现准确对风，所以采用数控技术实现自动迎风控制，使用同一套自动控制机构实现大风时的顺桨限速，也就是使风轮扫掠面平行于风向，由于浓缩风能装置的遮蔽作用，既可以使叶片停转而限速，又可以保护叶片不受风载荷，起到了保护叶片的作用。

（4）噪声方面。与普通型风电机组相比，浓缩风能型风电机组机械噪声和空气动力学噪声都相对较小。浓缩风能型风电机组采用低额定转速的发电机，即发电机达到额定输出功率时，发电机转速较低，振动较小，同时浓缩风能装置为发电机部分工作提供了较好的工作环境，杂物不容易进入机体，可使发电机长期处于稳定的工作状态，因此发电机产生的噪声较小。机组尾翼中心线与浓缩风能装置的对称中心线无偏心、无振动、过渡平滑，并没有附加的调速和对风机构，也没有偏尾机构，因此对风、调速机构产生的噪声较小。绝大部分的空气动力学噪声来自线速度最高的部位——叶尖，在功率相同的情况下，浓缩风能型风电机组的叶尖速度比普通型风电机组小；相同功率输出时，风轮直径比普通型风电机组风轮直径小，风轮所受冲击载荷小，浓缩风能装置也具有减振降噪的作用，故产生的噪声较小。

（5）安全性方面。浓缩风能型风电机组的风轮安装在浓缩风能装置内，即使损坏飞落，也不会伤害人、畜和建筑物，在运行使用过程中具有很高的安全性。随着浓缩风能型风电机组向大型化和海上风电机组发展，在台风等极端风况下机组可通过智能控制及时关闭浓缩风能装置的进风口、出风口，可以避免极端载荷与复杂载荷对机组生存与运行的破坏失效。浓缩风能型风电机组的降载控制方法和技术能够提高机组运行的安全性。



1.2 浓缩风能型风电机组发展历程

浓缩风能型风电机组的发展主要分为 3 个阶段：早期结构比较复杂，转动箱和固定翼箱的设计使得机组体积较大，制造用材较多，成本高且生产加工比较困难；中期的机组结构得到了部分简化，但是注入腔和抽吸腔的结构仍比较复杂；目前的机组结构是经过大量的优化和改进得到的，结构简单、易于加工，且功能完善，可以更好地实现浓缩风能的目的。

1.2.1 早期结构

20 世纪 90 年代，风力发电由于其制造费用高、年运转率低，因此经济性差，投入使用很难。进入实用阶段的风电机组，例如日本的 MWT250 型三菱风车，其 1 台的输出功率是 250kW，若要达到大容量输出，必须在一处设置几十台风电机组。为了改善经济性，需要制造大容量发电机组，以降低单位容量的价格、提高机组年运转率以及降低发电总量的单价。笔者结合内蒙古地区实际风能状况，提出了一种新的大容量风力发电装置，如图 1-2 所示，即早期的浓缩风能型风电机组结构，单机的输出功率是当时风电机组的几倍，

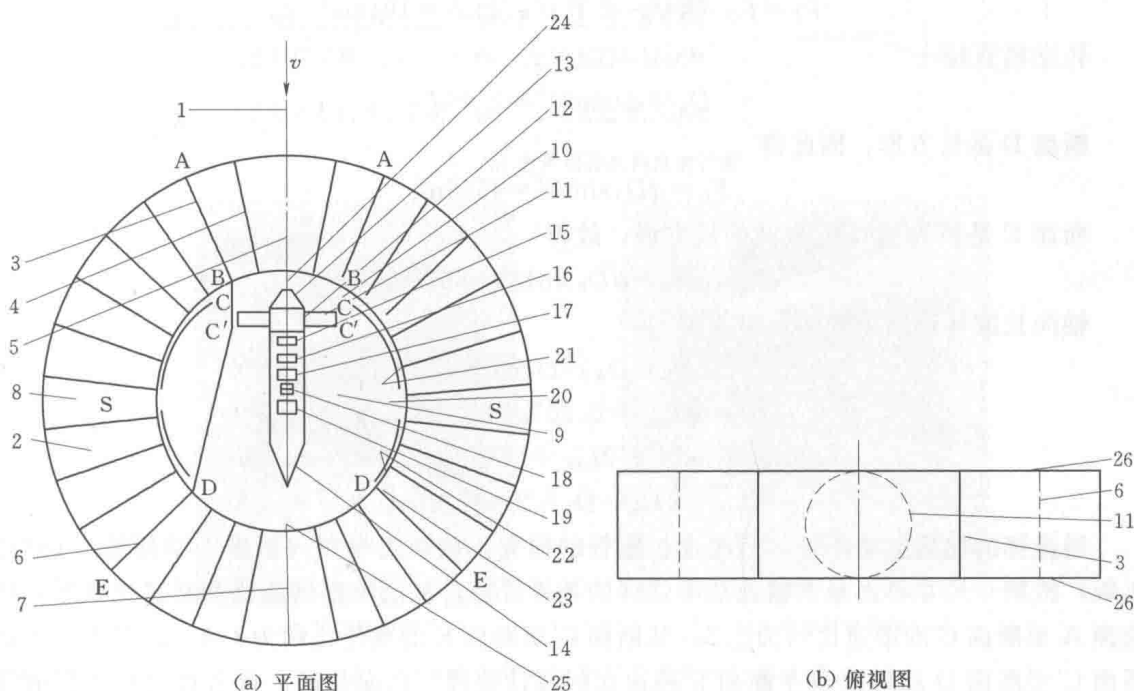


图 1-2 大容量风力发电装置

- 1—风向；2—固定翼箱；3—入口外侧固定翼；4—入口第二枚固定翼；5—入口中央固定翼；6—出口外侧固定翼；7—出口中央固定翼；8—固定翼箱侧面；9—转动箱；10—风路外壁；11—风电机组机翼；12—风电机组轮毂；13—入口机器箱；14—出口机器箱；15—低速行星齿轮增速箱；16—高速行星齿轮增速箱；17—小容量发电机；18—离合器；19—大容量发电机；20—转动箱低压室；21—转动箱前部外壁；22—转动箱后部外壁；23—抽气孔；24—转动箱入口部导流叶片；25—转动箱出口部导流叶片；26—上下壁