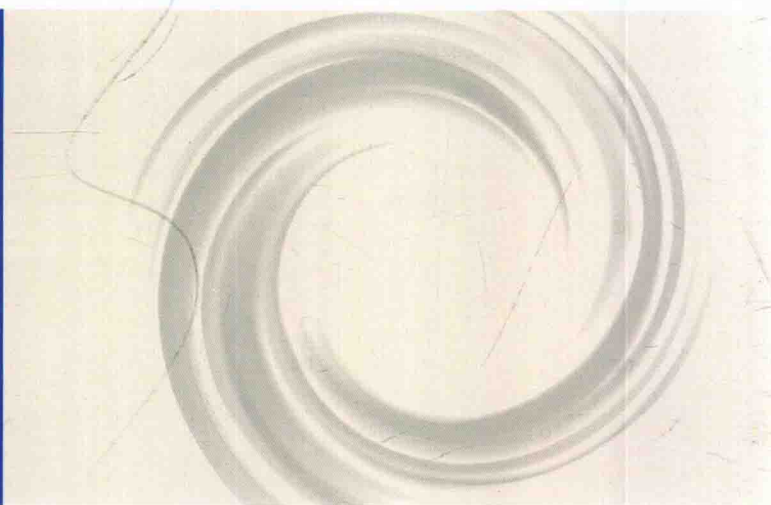
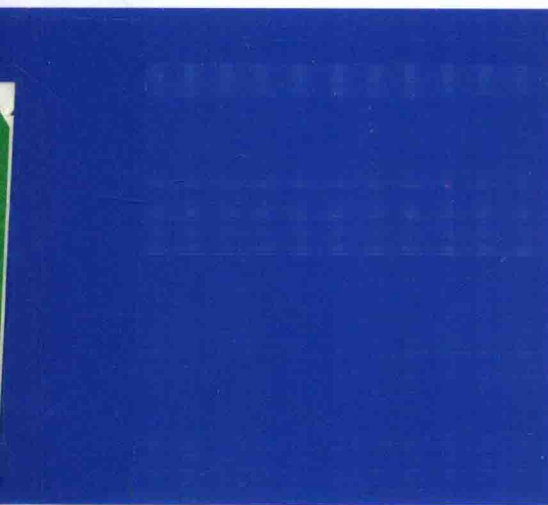




风力机空气动力学

THE AERODYNAMIC
OF WIND TURBINE

宋俊 编著



风力机空气动力学

宋 俊 编著

机械工业出版社

本书全面和系统地介绍了风力机空气动力学相关知识。全书共分为11章,包括绪论、气体运动学基础、气体动力学基础、水平轴升力型风力机概论、风力机经典动力学理论、风力机典型动力学专题、风力机翼型绕流理论、风力机系统气动弹性耦合、风力机数值分析技术、风力机模型气动试验和垂直轴风力机空气动力特性。另外,在附录中还介绍了大气边界层内的风特性以及风电场中的风力机尾流。

本书适合作为大专院校教材及对从事风力机设计、制造和使用的人员进行培训的教学用书,也可以作为风力机爱好者的自学读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

风力机空气动力学/宋俊编著. —北京:机械工业出版社, 2019. 3
ISBN 978-7-111-62434-9

I. ①风… II. ①宋… III. ①风力发电机-空气动力学 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 063209 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 林春泉 责任编辑: 林春泉

责任校对: 张薇 封面设计: 鞠杨

责任印制: 张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.75 印张·437 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-62434-9

定价: 49.00 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

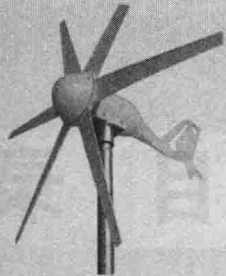
机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前言



为了满足教学的需求而撰写此书。希望有助于与风力机相关专业的学生更好地了解风力机空气动力学，并在此基础上创新和发展。

全书共分为 11 章。第 1~4 章，包括绪论、气体运动学基础、气体动力学基础、水平轴升力型风力机概论，主要介绍了基本概念和理论，是研究风力机空气动力学的基础；第 5~8 章，包括风力机经典动力学理论、风力机典型动力学专题、风力机翼型绕流理论和风力机系统气动弹性耦合，是风力机空气动力学的核心内容，考虑到不同层次读者的需求，各章的内容是相对独立的，读者和教师可以根据具体情况有所取舍。第 9 章、第 10 章，包括风力机数值分析技术和风力机模型气动试验，是风力机空气动力学学术研究的相关知识，可以作为研究人员、研究生选题、分析和试验的参考。以上内容主要针对水平轴升力型风力机。第 11 章介绍了垂直轴风力机空气动力特性，并与水平轴机型进行比较。另外，在附录中还介绍了大气边界层内的风特性以及风电场中的风力机尾流，这些内容是作为风力机空气动力学的背景知识介绍的，同时为正文提供了一些必要的概念和数据。为了便于教学和自学，书中编入了一些例题，每章后附加若干习题，计算题后附有最终答案。例题和习题都不追求复杂的运算，主要目的是为了巩固基本概念和理论。

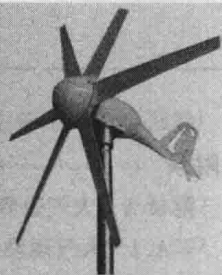
本书在内容安排上力求理论与实际相结合。在介绍气体动力学时做到有的放矢，“的”就是风力机。凡是与风力机联系不大的内容则不涉及。在利用气体动力学研究风力机时，则力争做到重点突出，“重点”就是风力机空气动力特性。对于风力机的其他问题，也不在选项之内，以便有利于读者集中了解必须掌握的核心内容。

空气动力学应用的数学知识较多，有些物理和数学概念较抽象，描述现象的数学模型较复杂，初学者或许会遇到一些困难。但学习风力机空气动力学的目的不是去面对复杂的推导和对推导结果的死记硬背，而是要理解概念和理论的物理意义，掌握概念和理论的实际应用。风力机空气动力学自始至终都在强调如何抓住物理现象的本质和主要影响因素，如何针对具体背景将复杂的物理现象简化成可求解的数学模型，将分析结果表述为可理解、可应用的规律，这些思维方法和解决方案对于读者都是大有益处的。

最后，对参考文献中列举资料的作者深表感谢，这些资料都使本书的作者受益匪浅。另外，也期待广大读者的批评和建议。

作者于 2019 年 1 月

主要物理量符号表



- a ——轴向气流诱导因子, 复平面上圆的半径
 a' ——切向气流诱导因子
 \mathbf{a} ——加速度矢量
 A ——面积
 A_d ——风轮的扫掠面积
 c ——翼型几何弦长
 c_p ——压强系数
 C ——常数
 C_p ——风能利用系数
 C_l ——升力特征系数
 C_d ——阻力特征系数
 C_m ——气动俯仰力矩系数
 C_F ——推力系数
 C_T ——转矩系数
 C_n ——法向力系数
 C_t ——切向力系数
 D ——阻力
 f ——单位质量力矢量
 f ——翼型弯度
 \bar{f} ——翼型相对弯度
 F ——力
 F_n ——轴向推力
 F_t ——切向力 (驱动力)
 F_p ——叶尖损失系数
 F_h ——轮毂损失系数
 g ——重力加速度
 h ——高度, 切向干扰因子
 I ——涡流强度
 k ——轴向干扰因子
 K ——体积弹性模量
 l ——长度
 L ——升力
 m ——质量
 Ma ——马赫数
 \mathbf{n} ——法向单位矢量
 N ——叶片数
 p ——压强, 应力
 p_w ——风功率密度
 P ——功率
 q_v ——(体积) 流量
 q_m ——质量流量
 r ——叶素所在半径
 R ——合力, 风轮半径
 t ——时间, 温度
 T ——力矩, 转矩, 热力学温度
 \mathbf{v} ——风速矢量
 \bar{v} ——平均风速
 v' ——脉动风速
 v_d ——风轮的气流速度
 v_∞ ——上游未受扰动的气流速度
 v_w ——尾流远端气流速度
 V ——体积
 \mathbf{w} ——合成 (相对) 速度矢量
 W ——风能
 z_0 ——粗糙度长度
 α ——攻角
 α_{cr} ——临界攻角
 β ——叶素桨距角
 γ ——风轮偏航角
 Γ ——环量
 δ ——翼型厚度
 $\bar{\delta}$ ——翼型相对厚度
 Δ ——增量
 η ——效率
 θ ——角度
 λ ——尖速比
 λ_r ——周速比
 μ ——动力黏度

ν ——运动黏度

ρ ——密度

σ ——弦长实度；复平面上点间距离

τ ——切应力

φ ——气流倾角

Φ ——速度势函数

X ——复势

Ψ ——流函数

ω ——旋转角速度矢量

Ω ——风轮转动角速度

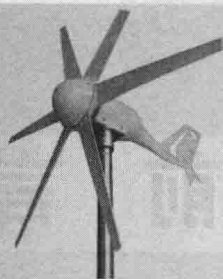
Ω ——涡量

∇ ——梯度

$\nabla \cdot$ ——散度

$\nabla \times$ ——旋度

目 录



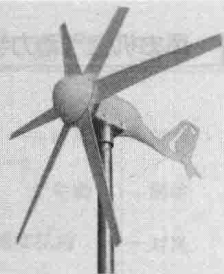
前言	
主要物理量符号表	
第 1 章 绪论	1
1.1 风能的利用	1
1.2 风力机概要	2
1.2.1 基本参数	2
1.2.2 组成	2
1.2.3 分类	3
1.3 气体的物理性质	3
1.3.1 气体易流动性及可压缩性	4
1.3.2 气体的连续介质模型	4
1.3.3 气体的密度和重度	4
1.3.4 气体的压缩系数及热膨胀系数	6
1.3.5 气体的黏性	7
1.3.6 作用在气体上的力	8
1.3.7 大气压强及压强的表示方法	9
1.4 风力机空气动力学概述	10
1.4.1 基本特点	10
1.4.2 研究内容	11
1.4.3 研究方法	11
习题	12
第 2 章 气体运动学基础	13
2.1 基本概念	13
2.1.1 流场及其描述	13
2.1.2 研究气体运动的方法	16
2.1.3 迹线和流线	19
2.1.4 流管、流量和平均流速	20
2.1.5 动能与功率	22
2.2 连续性方程	22
2.3 气体微团运动的分析	25
2.4 理想气体的有旋流动	30
2.4.1 基本概念	30
2.4.2 斯托克斯定理	32
2.4.3 汤姆逊定理和亥姆霍兹旋涡定理	33
2.4.4 旋涡的诱导速度	34
2.5 有势流动和速度势函数	36
2.5.1 速度有势	36
2.5.2 定密度无旋流动的基本方程	38
2.5.3 曲线的速度环量与速度势	38
2.5.4 等势面	39
2.6 平面流动和流函数	39
2.6.1 流函数定义	39
2.6.2 流函数的基本性质	40
2.6.3 流函数方程的物面边界条件	42
2.6.4 流函数与速度势	42
2.7 湍流模型	43
2.7.1 雷诺平均	44
2.7.2 连续性方程	46
习题	46
第 3 章 气体动力学基础	48
3.1 基本概念	48
3.1.1 气体动力学的基本方程	48
3.1.2 理想气体中的应力	48
3.1.3 气体质点的加速度	49
3.2 定密度黏性气体的运动方程	50
3.3 理想气体运动微分方程	53
3.3.1 欧拉方程	53
3.3.2 兰姆-葛罗米柯方程	53
3.3.3 佛里德曼方程	54
3.4 欧拉积分和伯努利积分	55
3.4.1 欧拉积分	55
3.4.2 伯努利积分	56
3.4.3 伯努利方程	57
3.5 压缩性气体的伯努利方程	58
3.6 起始条件和边界条件	59
3.6.1 起始条件	60
3.6.2 边界条件	60

3.7 动量方程和动量矩方程	60	5.7.1 空气阻力的影响	110
3.7.1 动量方程	60	5.7.2 有限叶片数的影响	111
3.7.2 动量矩方程	61	5.8 风力机动力学参数的修正	112
3.8 边界层理论	62	5.8.1 应用叶尖和轮毂损失系数的 修正	112
3.8.1 边界层及其特征	62	5.8.2 应用风轮所受推力的修正	114
3.8.2 边界层微分方程	63	5.8.3 存在风轮锥角的修正	116
3.8.3 边界层的分离	64	5.9 实际风力机的功率特性	116
3.8.4 再附现象	65	习题	117
3.9 绕圆柱体流动——卡门涡街	66	第6章 风力机典型动力学专题	118
3.10 湍流运动微分方程	67	6.1 尾迹涡流理论	118
3.10.1 湍流黏性系数模型	67	6.1.1 涡流模型	118
3.10.2 标准 $k-\varepsilon$ 模型	68	6.1.2 固定尾迹涡模型	120
习题	69	6.1.3 预定尾迹涡模型	123
第4章 水平轴升力型风力机概论	71	6.1.4 自由尾迹涡模型	126
4.1 水平轴升力型风力机综览	71	6.2 叶片的三维效应及动态绕流	129
4.2 风轮	75	6.2.1 失速延迟	129
4.2.1 几何定义	75	6.2.2 动态失速	131
4.2.2 物理参数	76	6.2.3 动态入流效应	133
4.3 叶片与翼型	77	6.3 风力机偏航的空气动力模型	133
4.3.1 叶片的外部特征	77	6.3.1 固定偏航时的动量定理	134
4.3.2 翼型	78	6.3.2 动态尾流算法	136
4.4 叶素	81	6.3.3 偏航/倾斜模型	137
4.4.1 作用在叶素上的空气动力	82	习题	138
4.4.2 叶素上的阻力源	84	第7章 风力机翼型绕流理论	139
4.4.3 叶素气动特性影响因素	85	7.1 定密度理想气体平面无旋流动的 概述	139
4.5 风力机的运行及控制	86	7.2 复势与复速度	139
4.5.1 风轮所受的空气动力载荷	86	7.2.1 复势与复速度定义	139
4.5.2 叶片数	87	7.2.2 解的可叠加性	140
4.5.3 风力机的调节特性	88	7.3 典型的简单平面势流及其复势	140
4.5.4 风力机的控制目标和方式	88	7.3.1 均匀流	140
习题	90	7.3.2 源与汇	141
第5章 风力机经典动力学理论	91	7.3.3 点涡	143
5.1 一维动量理论与贝茨极限	91	7.3.4 偶极流	144
5.2 简化旋转尾流模型	94	7.4 圆柱绕流	147
5.2.1 诱导速度最佳关系式	95	7.4.1 无环量圆柱绕流	147
5.2.2 最佳气流倾角	97	7.4.2 有环量圆柱绕流	149
5.3 叶素-动量理论——气流诱导因子 算法	101	7.5 定常绕流中的物体受力	152
5.4 叶素-动量理论——气流干扰因子 算法	103	7.5.1 勃拉休斯合力及合力矩公式	153
5.5 风轮整体参数	108	7.5.2 库塔-儒可夫斯基升力定理	155
5.6 风力机经典动力学理论比较	108	7.6 物体绕流的保角变换方法	157
5.7 风力机的实际风能利用系数	109	7.6.1 无分离流动保角变换方法的基本	

思想	157	9.2.2 确立边界条件及初始条件	201
7.6.2 物理平面与辅助平面上对应的 流动关系	157	9.3 确定离散化方法	202
7.6.3 解析变换的唯一性定理	159	9.3.1 划分计算网格	202
7.6.4 任意柱形物体绕流变换为圆柱 绕流的一般形式	160	9.3.2 方程离散	202
7.7 儒可夫斯基绕流变换	162	9.4 对流场进行求解	205
7.7.1 儒可夫斯基变换	162	9.5 显示计算结果	205
7.7.2 儒可夫斯基翼型绕流	167	9.6 应用 CFD 方法的研究内容	206
7.8 库塔-儒可夫斯基假定	171	9.6.1 对翼型气动性能的研究	206
7.8.1 库塔条件	171	9.6.2 对风轮气动性能的研究	206
7.8.2 翼型绕流环量形成的物理过程	172	9.7 常用的 CFD 软件	207
7.8.3 推广的库塔-儒可夫斯基假定	173	习题	209
7.9 薄翼理论与气动特性	173	第 10 章 风力机模型气动试验	210
7.9.1 薄翼型绕流的扰动速度势及其 分解	174	10.1 风洞	210
7.9.2 攻角-弯度问题及其求解	176	10.2 相似理论	212
7.9.3 薄翼型的升力和力矩	179	10.2.1 相似条件	212
习题	180	10.2.2 动力相似准则	215
第 8 章 风力机系统气动弹性耦合	181	10.2.3 相似结果	217
8.1 风力机气动弹性现象及耦合原理	181	10.2.4 模型机试验中的问题	219
8.1.1 叶片气动弹性稳定性	181	10.3 量纲分析方法	220
8.1.2 整机振动和稳定性	184	10.3.1 基本量纲与导出量纲	220
8.2 多体动力学基础	184	10.3.2 量纲的一致性原理	221
8.2.1 基本概念	185	10.3.3 瑞利法	221
8.2.2 多体动力学原理	185	10.3.4 π 定理	222
8.3 气动弹性耦合原理	188	10.4 风洞试验项目	224
8.3.1 运动学连续性条件	188	10.4.1 风力机风轮性能试验	224
8.3.2 动力学连续性条件	189	10.4.2 风力机风轮载荷试验	225
8.3.3 能量守恒条件	189	10.4.3 风力机叶片压力分布试验	226
8.4 风力机系统的动力学模型及稳定性 分析	189	10.4.4 风力机叶片流动显示试验	227
8.4.1 坐标系	190	10.5 模型与洞壁干扰的修正	228
8.4.2 自由度数	191	10.5.1 常规洞壁影响修正	228
8.4.3 质点相对运动动力学基本方程	192	10.5.2 侧壁干扰修正	230
8.4.4 风力机系统动力学方程	192	习题	230
8.4.5 气动弹性动力响应分析	197	第 11 章 垂直轴风力机空气动力 特性	231
8.4.6 气动弹性稳定性分析	197	11.1 升力型垂直轴风力机	231
习题	198	11.1.1 结构形式	231
第 9 章 风力机数值分析技术	200	11.1.2 达里厄型风力机的工作原理	234
9.1 计算流体力学概述	200	11.1.3 达里厄型风力机的基本理论	234
9.2 建立数学模型	201	11.2 阻力型垂直轴风力机	239
9.2.1 建立控制方程	201	11.2.1 结构形式	239
		11.2.2 萨沃尼斯型垂直轴风力机	241
		11.2.3 阻力叶片空气动力分析	242

习题	243	A.4 极端风特性	263
附录	244	A.4.1 极端风	263
附录 A 大气边界层内的风特性	244	A.4.2 重现期	264
A.1 大气运动	244	A.5 风能可利用区的划分	264
A.1.1 风的形成	244	附录 B 风电场中的风力机尾流	265
A.1.2 大气稳定度	247	B.1 半经验尾流模型	265
A.1.3 大气边界层	248	B.1.1 无黏近场尾流模型	265
A.2 平均风特性	249	B.1.2 丹麦半经验尾流模型	266
A.2.1 平均风速	249	B.1.3 AV 尾流模型	266
A.2.2 风力等级与风向	250	B.2 尾流区风特性	269
A.2.3 风况	252	B.2.1 尾流区平均速度	269
A.2.4 风功率及风功率密度	254	B.2.2 尾流区脉动速度	270
A.3 脉动风特性	257	B.3 尾流对风力机性能的影响	270
A.3.1 脉动风速	257	B.3.1 风力机串列布置	270
A.3.2 湍流强度	258	B.3.2 风力机斜列布置	271
A.3.3 湍流相关性	259	B.4 尾流对风力机载荷的影响	271
A.3.4 湍流积分尺度	261	B.5 风力机布局	272
A.3.5 湍流功率谱密度	263	参考文献	273

第 1 章



绪 论

本章介绍风力机空气动力学的背景知识，包括风能利用、风力机概要、空气的物理性质以及风力机空气动力学的研究内容和方法等。

1.1 风能的利用

人类利用风能已有数千年历史，在埃及，人们发现了 5000 年前帆船图案，它们被绘制在陶罐上，如图 1-1 所示。

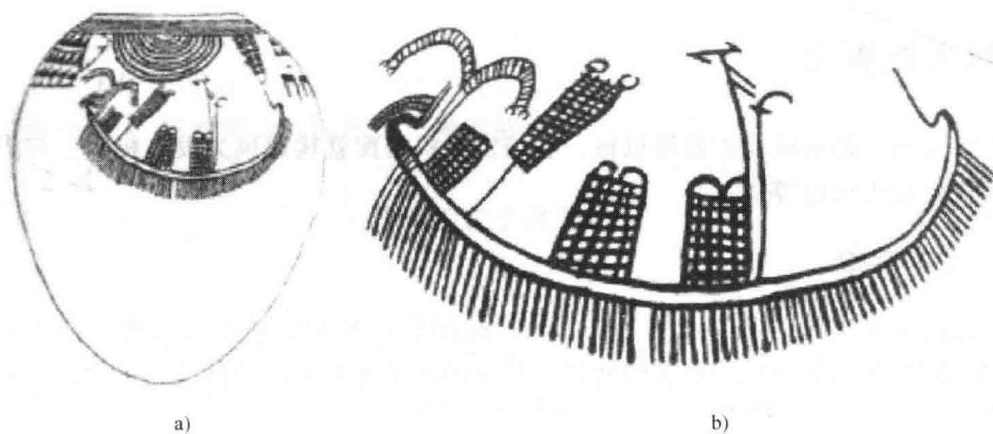


图 1-1 陶罐上的帆船
a) 陶罐 b) 帆船图案

在蒸汽机发明以前风能曾经作为重要的动力，用于船舶航行、提水饮用和灌溉、排水造田、碾米、磨面和锯木等。图 1-2 所示为风能利用的领域及流程。

目前，风能利用的主要领域是风力发电，特别是并网发电。风力提水、风力制热也可以利用电能间接实现。

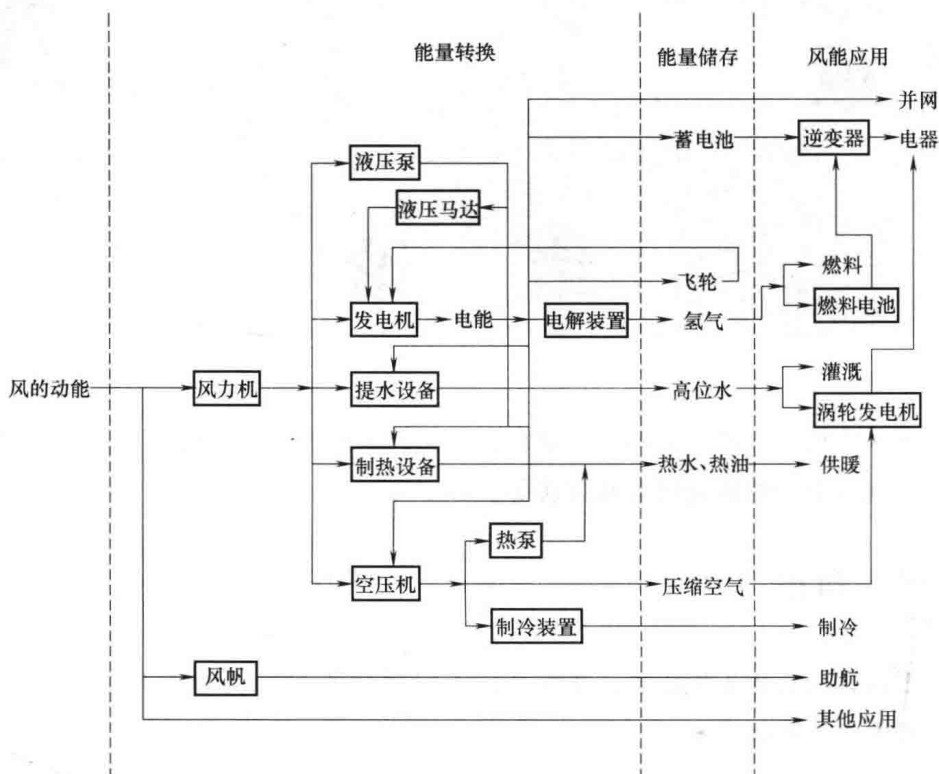


图 1-2 风能的利用

1.2 风力机概要

风力机是用于捕获风能的旋转机械。它与发电机搭配就构成风力发电机组，与提水机搭配就构成风力提水机组等。

1.2.1 基本参数

风力机的基本参数是风轮直径（或风轮扫掠面积）和额定功率。风轮直径决定风力机能够在多大的范围内获取风中蕴含的能量。额定功率是正常工作条件下，风力机达到的最大连续输出功率。

风轮直径应根据不同的风况与额定功率匹配，以获得最大的年发电量和最低的发电成本，必要时可配置较大直径风轮供低风速区选用，配置较小直径风轮供高风速区选用。

1.2.2 组成

风力机包括风轮、功率调节机构和辅助机构（见图 1-3）。风轮由叶片和轮毂组成。叶片具有空气动力外形，在气流作用下产生力矩驱动风轮转动，通过轮毂将转矩输入到主传动链。功率调节机构包括调速系统或变桨距系统等。辅助机构包括传动、制动、对风和支承等部分。传动部分包括主轴及主轴承、齿轮箱、联轴器等；制动部分包括制动盘和制动器等；对风部分包括尾舵、侧轮或主动偏航系统等；支承部分包括机舱、塔架和基础等。

1.2.3 分类

风力机的种类和分类标准很多，主要有：

1) 按额定功率分

① 小型 10kW 以下，主要用于离网发电、风力提水等场合，一般采用尾舵自动对风。

② 中型 10~600kW，主要用于微网发电等场合。

③ 大型 大于 600kW，主要用于并入大型公共电网发电的场合。目前，常用的大型风力机为 2.5~4MW，最大可达 10MW。

2) 按驱动原理分

① 升力型 风轮旋转是由叶片所受的升力作用引起的。

② 阻力型 风轮旋转是由叶片对风的阻力作用引起的。

3) 按风轮轴方向分

① 水平轴 水平轴风力机是风轮轴基本上平行于风向的风力机。工作时，风轮的旋转平面与风向基本垂直。

水平轴风力机随风轮与塔架相对位置的不同而有上风式与下风式之分（见图 1-4）。风轮在塔架的前面迎风旋转，称为上风式风力机；风轮安装在塔架后面，风先经过塔架，再到风轮，则称为下风式风力机。上风式风力机必须有某种调向装置来保持风轮迎风。而下风式风力机则能够自动对准风向，从而免去了调向装置。但对于下风式风力机，由于一部分空气通过塔架后再吹向风轮形成所谓“塔影效应”，影响风力机的出力，使性能有所降低。

② 垂直轴 垂直轴风力机是风轮轴垂直于风向的风力机。

4) 按额定功率调节方式分

① 定桨距 叶片固定安装在轮毂上，角度不能改变。当风速超过额定风速时，利用叶片本身的空气动力学特性减小旋转力矩维持输出功率相对稳定。

② 变桨距 这种风力机当风速过高时，通过叶片安装角度的变化，改变获得的空气动力转矩，能使功率输出保持稳定。

③ 主动失速 这种风力机的工作原理是以上两种形式的组合。当机组达到额定功率后，通过叶片安装角度的反向变化，利用叶片本身的空气动力学特性减小旋转力矩，从而限制风能的捕获。

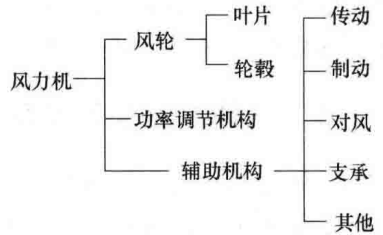


图 1-3 风力机的组成

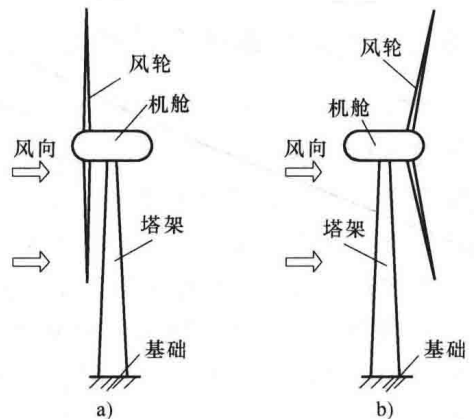


图 1-4 风力机与风向

a) 上风式 b) 下风式

1.3 气体的物理性质

空气是一种典型的气体。气体常常呈现出不同的运动规律，这除与外界条件（外力作

用及边界条件) 有关外, 与气体的自身性质也有直接关系。因此, 在研讨气体的力学规律时, 首先要了解气体的各种特性。

1.3.1 气体易流动性及可压缩性

气体与固体的主要区别在于气体具有易流动性。即气体静止时是不能承受切向应力的, 因此任何微小的切向应力都可以使气体发生变形运动。气体的这个宏观力学性质, 称为易流动性。

对一定量的气体而言, 它既没有一定的体积, 也没有一定的形状。气体不能形成自由表面, 总是均匀充满容器或空间。这是因为从微观上看, 气体分子间的距离很大, 相互作用力很小。例如: 在常温常压力下, 气体的分子距为 $3 \times 10^{-7} \text{cm}$, 其分子的有效直径的数量级为 10^{-8}cm , 可见分子距比分子有效直径大一个数量级。这样, 当气体受外界压力作用时, 直到分子距缩小很多时, 才会出现分子斥力。通常, 气体分子彼此之间不能约束, 所以运动速度较快, 都在做无规则的热运动, 在它们之间没有发生碰撞 (或碰撞器壁) 之前, 均做匀速直线运动, 只有在彼此之间发生碰撞时, 才改变运动的方向和运动速度的大小, 相互间不断碰撞交换着能量和动量。由于气体分子间的距离远远大于分子本身的体积, 所以气体的密度较小, 对体积变化抗拒力较小, 通常认为是可压缩的。

1.3.2 气体的连续介质模型

气体分子间是有一定间隙的。因此从微观看, 气体是不连续的。但是, 气体力学所研究的不是气体个别分子的微观运动, 而是研究由大量分子组成的气体在外力作用下引起的宏观运动规律。气体的宏观物理量 (如压力、速度和密度等), 都是大量分子运动的平均效果, 而且这些宏观物理量, 都是可以从实验中观测得到的。

为了以宏观气体模型来代替微观的有间隙的分子结构, 1753 年欧拉 (Euler) 首先提出了“连续介质”作为宏观的流体模型。这个“连续介质”模型就是假定气体不是由彼此间有间隙的分子组成, 而是由无限多气体微团 (或称气体质点) 所组成的稠密而无间隙的连续介质, 它充满了气体所占据的空间。所谓气体质点是指具有无穷小体积的气体分子团。这个分子团宏观上很小, 以至于可以把它看成没有维度的几何点。而微观上又要充分大, 以至于分子团内仍含有大量分子。由于分子的间距较之分子本身的尺寸虽然较大, 但与一般工程上常用的宏观度量尺寸比较则是微不足道的, 因此这种忽略气体分子间距的“连续介质”模型的假设是可行的。

气体既然被看成是充满了空间各点的连续介质, 这样, 反映气体宏观运动的各运动参数 (压力、速度、密度等) 就都是空间坐标和时间的连续函数, 这就有可能采用连续函数的数学工具来表示气体处于平衡或运动状态下的各参数。

1.3.3 气体的密度和重度

1. 气体的密度

单位体积气体内的质量称为密度, 用符号 ρ 表示。在气体内任意点处取某一微小体积 ΔV , 该体积内所包含的气体质量为 Δm , 则该体积的气体的平均密度为 $\rho_m = \Delta m / \Delta V$ 。因为气体是连续介质, 若将体积 ΔV 向一点无限收缩并趋于零, 则可得该任意点处的气体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta m / \Delta V = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

气体的密度随压力 p 和温度 T 而变化, 即 $\rho = \rho(p, T)$ 。密度 ρ 、热力学温度 T ($T = 273 + t^\circ\text{C}$) 及绝对压力 p 之间的关系可用状态方程表示

$$p = \rho R_G T \quad (1-2)$$

式中 R_G ——气体常数。

这样, 气体的密度为

$$\rho = \frac{p}{R_G T} \quad (1-3)$$

在法定单位制中, 质量 m 单位为 kg , 体积 V 单位为 m^3 , 则密度的单位为 kg/m^3 。

空气密度 ρ 的大小直接关系到风能的多少, 特别是在海拔高的地区, 影响更为突出。海平面空气密度见表 1-1, 在 15°C 时, 空气密度为 $1.225\text{kg}/\text{m}^3$, 通常作为标准空气密度。湿度增加, 空气密度会有一些降低。冷空气通常比暖空气密度大。

表 1-1 空气密度表

温度/ $^\circ\text{C}$	温度/ $^\circ\text{F}$	干燥气体密度/ (kg/m^3)	最大水分含量/ (kg/m^3)
-25	-13	1.423	
-20	-4	1.395	
-15	5	1.368	
-10	14	1.342	
-5	23	1.317	
0	32	1.292	0.005
5	41	1.269	0.007
10	50	1.247	0.009
15	59	1.225	0.013
20	68	1.204	0.017
25	77	1.184	0.023
30	86	1.165	0.030
35	95	1.146	0.039
40	104	1.127	0.051

随着各地海拔、气温和气压的不同, 空气密度也各异, 在不同的气压、气温和水汽压情况下, 空气密度计算公式为

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366t} \times \frac{(p - 0.378e)}{1000} \quad (1-4)$$

式中 p ——气压, 单位为 hPa ;

t ——气温, 单位为 $^\circ\text{C}$;

e ——水汽压, 单位为 hPa 。

计算空气密度随高度变化的经验公式:

$$\rho = 1.225e^{-0.0001h} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——对应高度 h 处的气体密度；

h ——海拔。

气体运动速度 v 与静止气体中声速 v_c 的比值称为马赫数，用 Ma 表示，即

$$Ma = \frac{v}{v_c} \quad (1-6)$$

如果气流的马赫数小于 0.3 时，其密度 ρ 变化很小。实测表明，在标准大气压下，温度为 288.2K 时的海平面上，空气所对应的声速为 340.3m/s。可见，风力机实际运行工况下，马赫数远小于 0.3。故可以近似认为密度 ρ 为常数。此时，称空气流为“不可压缩”流，或称定密度流。

2. 重度

由于地球的引力，质量为 Δm 的物体产生 ΔG 的重力，地球对单位体积内质量的引力而产生的重力，称为重度，用符号 γ 表示

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta V}$$

由于重力 G 是质量 m 和重力加速度 g 的乘积，即 $G = mg$ ，由此可得重度和密度的关系为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-7)$$

在法定单位制中，重度的单位为 N/m^3 。

1.3.4 气体的压缩系数及热膨胀系数

气体随着压力和温度的变化而发生体积变化。压力、温度对气体体积影响比液体显著。

1. 压缩系数

气体受压力的作用发生体积变化的性质称压缩性。压缩性的大小可用压缩系数 β_p 表示

$$\beta_p = -\frac{dV}{Vdp} \quad (1-8)$$

式中 V ——压力变化前的气体体积；

dp ——压力的增量；

dV ——当压力增量为 dp 时，气体体积的增量。

压缩系数 β_p 表示每增加（或减少）一个单位压力时，气体体积的相对变化率。 β_p 的单位为 $1/Pa$ 或 cm^2/kgf 。由于压力增大时（即 dp 为正），体积必然减小（即 dV 为负），比值 dV/dp 永远为负，所以在公式的右边加上负号，以保持 β_p 永远为正。

压缩系数的倒数称为体积弹性模量，用符号 K 表示，即

$$K = \frac{1}{\beta_p}$$

2. 线膨胀系数

气体体积随温度升高而增大的性质称为热膨胀性。膨胀性大小用线膨胀系数 β_t 表示

$$\beta_t = \frac{dV}{Vdt} \quad (1-9)$$

式中 dt ——温度变化值，单位 $^{\circ}\text{C}$ 。

β_t 表示每增加一个单位温度时，气体体积的相对变化率，其单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。

由于在压缩和膨胀过程中气体质量不变，故式(1-8)和式(1-9)可分别写成

$$\beta_p = \frac{d\rho}{\rho dp} \quad (1-10)$$

$$\beta_t = -\frac{d\rho}{\rho dt} \quad (1-11)$$

1.3.5 气体的黏性

1. 气体黏性的定义

气体流动时，在气体内部产生内摩擦力的性质称为黏性，黏性是气体物理性质中最重要的特性。

以图1-5所示平行平板间气体流动为例，研究黏性的产生及其大小。平板间充满气体，上平板以速度 v_h 运动，下平板不动。贴近两平板的气体必须黏附于平板，紧贴于运动面上的气体必然以与运动面相同的速度 v_h 运动，而紧贴下平板面的气体的速度则为零，两平板间的各气体层的速度，由实验得知，从零到 v_h 按线性规律变化。运动较快的流层带动较慢的流层，而运动慢的流层又阻滞运动较快的流层，不同速度流层之间互相牵制，产生层与层之间的摩擦。

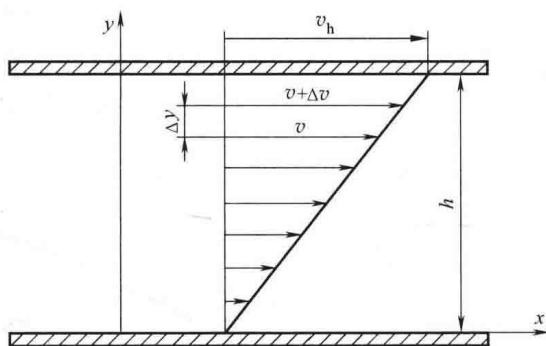


图 1-5 平行平板间气体流动

这就是气体在流动过程中由于黏性而产生的内摩擦力。流层间的内摩擦力 F 与流层的接触面积 A 及流层的相对速度 dv 成正比，而与此二流层间的距离 dy 成反比，即

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-12)$$

此公式称为牛顿摩擦定律。

式中 $\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度，表示沿气体流层法向单位长度上速度的变化率，当层间距很小时，

可近似认为 dv 与 dy 为直线关系；

μ ——动力黏度，表示气体黏性大小的系数。

以 $\tau = F/A$ 表示切应力，则有

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-13)$$

在一般情况下，当气体处于静止状态或气体质点间无相对运动时，得 $\frac{dv}{dy} = 0$ ，则 $F = \tau = 0$ 。这说明在静止气体中不呈现内摩擦力。这一点与固体之间的摩擦力情况不同，对于互相接触的两个固体，如果它们受有外力而存在着作相对运动的趋势，即使还处于静止状态，在