



风力发电职业培训教材

Vocational Training Materials for Wind Farm

第一分册

风力发电基础理论

Wind Power Fundamentals



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



风力发电职业培训教材

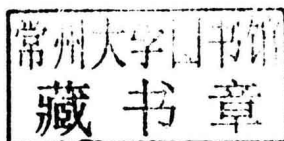
Vocational Training Materials for Wind Farm

第一分册

风力发电基础理论

Wind Power Fundamentals

龙源电力集团股份有限公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为了提高风电从业人员的职业技能水平,特编写了本套《风力发电职业培训教材》,该教材共分四个分册,《风力发电基础理论》《风电场安全管理》《风电场生产运行》《风力发电机组检修与维护》。

《风力发电基础理论》分册共分9章,内容包括风力发电发展综述、风能资源和风电场、风力发电的空气动力学原理、风力发电机组分类及典型结构、风轮、风力发电机组传动系统、风力发电机组发电机、风力发电机组控制系统、风电场电气与监控系统、风电机组其他系统等内容。

本套教材内容丰富,图文并茂,条理清晰,实用性强,编写人员是有丰富经验的行业专家。本套书可作为风电行业新入职员工、安全管理人员、风电场运行检修人员技能培训教材使用,也可供职业院校风电专业师生及从事风电行业的科研、技术人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电职业培训教材.第1分册,风力发电基础理论/龙源电力集团股份有限公司编.—北京:中国电力出版社,2016.3

ISBN 978-7-5123-8973-1

I. ①风… II. ①龙… III. ①风力发电-职业教育-教材 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第041242号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年3月第一版 2016年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.5印张 352千字

印数0001—3000册 定价88.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编辑委员会

主任委员 李恩仪 黄 群

常务副主任委员兼主编 张宝全

副主任委员兼副主编 吴金城 杜 杰 张 敏 岳俊红

朱炬兵 李力怀 夏 晖 孙海鸿

秘书长 孙海鸿（兼）

委员 （按姓氏笔画排序）

王 博 王 贺 王延峰 邓 杰

叶杭冶 田文奇 冯江哲 冯宝平

司 松 朱耀春 朱辉玉 任淮辉

庄加利 刘钟淇 刘智益 刘瑞华

刘锦如 孙 浩 江建军 汤涛祺

李晓雪 李 闯 肖 剑 吴声声

何 灏 何文雄 宋中波 张冬平

张海涛 张悦超 张国珍 陈 刚

陈 默 范晓旭 和军梁 周世东

郎斌斌 赵小明 杨天宇 荣兴汉

宣安光 胡 宾 胡 鹏 胥 佳

徐海华 郭慧东 唐元祥 陶钢正

黄晓杰 曹建忠 寇福平 曾繁礼

薛 蕾 魏 亮

序 言

随着以煤炭、石油为主的一次能源日渐匮乏，全球气候变暖、环境污染等问题的不断加剧，人类生存环境面临严峻挑战。有鉴于此，风力发电作为绿色清洁能源的主要代表，已成为世界各主要国家一致的选择，在全球范围内得到了大规模开发。龙源电力集团股份有限公司是中国国电集团公司所属，以风力发电为主的新能源发电集团，经过多年的快速发展，2015年6月底以1457万kW的风电装机规模，成为世界第一大风电运营商。

在风电持续十多年的开发建设中，风力发电设备日渐大型化，机型结构和控制策略日新月异，设备运行、检修和管理标准、规程逐步完善，并网技术初成系统。然而风电场地处偏远、环境恶劣、机型复杂、设备众多，人员分散且作业面广。随着装机容量和出质保机组数量的逐年增加，安全生产局面日趋严峻，如何加速培养成熟可靠的运行、检修人员，成为龙源电力乃至整个行业亟待解决的问题。

为强化风电运行和检修岗位人员岗位培训，龙源电力组织专业技术人员和专家学者，历时两年半，三易其稿，自主编著完成了《风力发电职业培训教材》。该套教材分为《风力发电基础理论》《风电场安全管理》《风电场生产运行》《风力发电机组检修与维护》四册，凝聚了龙源电力多年来在风电前期测风选址、基建工艺流程、安全生产管理以及科学技术创新的成果和积淀，填补了业内空白！

教材的主要特点有：一是突出行业特色，内容紧跟行业最新的政策、标准、规程及新设备、新技术、新知识、新工艺；二是立足岗位技能教育，贴合现场生产实际，结合风电运行、检修具体工作，图文并茂地介绍相应的知识和技能，在广度和深度上适用于各级岗位人员；三是文字通俗易懂，内容详略得当，具有一定的科普性。教材对其他机电类书籍已包含的内容不作详细介绍，不涉及深层次的风电研发、设计理论和推导，便于运检人员阅读和自学。

龙源电力作为国内风电界的领跑者，全球第一大风电运营商，国际一流的新能源上市公司，肩负着节能减排、开拓发展、育人成才的重任，上岗培训教材和其他系列培训教材的陆续出版将为风电行业的开发经营、人才培养起到积极作用！

编 者

前言

环境保护和能源危机是当今全球面临的重大问题,大力发展绿色能源已成为国际社会的共识。近年,世界各国都在努力开发和利用绿色能源,其中风力发电以其技术成熟、竞争力强的特点得到飞速发展。中国的风电产业增长速度为世人所瞩目,在短短的几年内风电装机容量和发电量跃居世界第一。

龙源电力集团股份有限公司作为国内最早从事可再生能源开发的企业,在风电发展规模和风电运行维护等方面持续领跑国内风电行业,形成了一整套较为规范、科学的安全生产管理体系。为提高一线风电员工的风电理论水平,加强员工安全生产素质培养,保证风机安全高效运行,龙源电力集团组织了一批具有扎实理论基础和丰富实践经验的技术骨干,精心编写了本套《风力发电职业培训教材》。

本书共分9章,内容包括:风电发展综述、风资源、风力发电的空气动力学原理、风电机组分类及典型结构、风轮、传动系统、发电机、控制系统和辅助系统等。该教材系统地介绍了风力发电原理和风力发电机组的整体结构及主要部件,内容全面丰富,不仅可以作为风电行业职业技术培训的教材,也可用作大专院校相关专业师生的参考资料。

《风力发电基础理论》一书由吴金城负责整体编排审定,第1章、第2章由吴金城编写;第3章、第5章由李晓雪编写;第4章由黄晓杰编写;第6章由宣安光编写;第7章由陈刚编写;第8章由叶杭冶、范晓旭、黄晓杰等共同编写;第9章由孙海鸿编写。其中陈默、朱辉玉参与了第2章的部分编写;李闯参与了第4章的部分编写。

在本书的编写过程中,得到了龙源电力集团人力资源部朱炬兵、胡宾、汤涛祺等同志的广泛指导和大力支持,中能电力科技开发有限公司申烛博士给予了本书精心修订和审核;云南龙源风力发电有限公司的贾克斌、江苏海上龙源风力发电有限公司的江建军、江苏龙源风力发电有限公司的江建瑜等风电专家也参与了本书的修订并提供了大量珍贵的参考资料;龙源电力集团所属的海南龙源、山东龙源、天津龙源等公司提出了宝贵的修改意见,在此一并表示诚挚感谢!

本书力求准确、详尽,但由于时间仓促,在编写过程中难免有疏漏之处,希望各位读者给予谅解并欢迎读者不吝指正。

编者

目 录

序 言 前 言

1 风力发电发展综述	1
1.1 早期的风能利用	1
1.1.1 东方风能利用史	1
1.1.2 西方的风车	3
1.1.3 美国西部的风车水泵	6
1.2 技术演变	6
1.3 风电技术趋势	14
1.3.1 单机容量持续增大	14
1.3.2 从定桨距（失速型）到变桨距	18
1.3.3 从定转速到变转速	18
1.3.4 传动系统的革新	19
1.3.5 叶片技术的发展	20
1.3.6 低风速、高海拔等特殊气候环境下风电机组的改进	20
1.4 海上风电场的兴起	21
1.5 我国的风电设备制造业	22
1.6 我国的风电开发	26
2 风资源	28
2.1 风的形成	28
2.1.1 气压梯度力和地转力	28
2.1.2 三圈环流	29
2.1.3 季风和局地环流	30
2.1.4 大气运动的时间尺度	33
2.2 大气层	34

2.2.1	大气的垂直分层结构	34
2.2.2	大气边界层	35
2.2.3	粗糙度和风切变	35
2.2.4	空气密度和气压	39
2.2.5	湍流	40
2.2.6	障碍物和地形对风速影响	41
2.3	测风	44
2.3.1	测风概述	44
2.3.2	风速测量	44
2.3.3	风向测量	46
2.3.4	记录仪	46
2.3.5	测风塔	47
2.3.6	我国测风历史演变	47
2.4	测风数据分析	48
2.4.1	数据处理	48
2.4.2	测风数据直接分析法	50
2.4.3	测风数据统计分析法	53
2.5	风资源评估	54
2.5.1	风功率密度	54
2.5.2	风向频率及风能密度方向分布	56
2.5.3	风速的日变化和年变化	56
2.5.4	湍流强度	56
2.5.5	其他气象因素	56
2.6	我国的风能资源分布	56
2.6.1	我国风能资源分布概述	56
2.6.2	我国主要的风能丰富区	57
2.6.3	影响我国风能资源分布的气象条件	57
2.6.4	影响风能利用的灾害性天气	58

3 风力发电的空气动力学原理 60

3.1	风能	60
3.2	贝茨理论	61
3.2.1	贝茨极限	61
3.2.2	有旋转尾流的风轮	62
3.2.3	风速和压力变化	63
3.3	翼型和空气动力特性	63
3.3.1	翼型的几何参数	64
3.3.2	升力和阻力	64

3.3.3	翼型截面对升阻力的影响	65
3.4	阻力型风力机与升力型风力机对比	67
3.5	风轮的空气动力学原理	68
3.5.1	几何定义	68
3.5.2	翼型的受力示意图	69
3.5.3	叶素特性分析	69
3.5.4	推力、转矩和功率的一般关系式	70
3.5.5	风电机组的输出功率	70
3.5.6	影响风轮特性的几个参数	71
3.6	风电机组的功率控制	73
3.6.1	失速控制	73
3.6.2	变桨距控制	75
4	风电机组分类及典型结构介绍	77
4.1	风电机组的技术演变	77
4.2	风电机组的分类	78
4.2.1	定桨距失速型风电机组	79
4.2.2	变桨距型风电机组	80
4.2.3	变桨变速型风电机组	81
4.3	典型风电机组简介	83
4.3.1	GW750 风电机组	83
4.3.2	UP1500 风电机组	85
4.3.3	GW1500 风电机组	89
4.3.4	半直驱机型 SCD 2.5/100	93
5	风轮	96
5.1	基本概念	96
5.1.1	叶片参数	96
5.1.2	风轮参数	97
5.2	叶片设计	99
5.2.1	设计要求	99
5.2.2	载荷计算	100
5.2.3	结构设计	100
5.3	叶片制造	101
5.3.1	材料	101
5.3.2	制造工艺	104
5.4	叶片主体结构	105
5.4.1	主体结构方案	105

5.4.2	叶根结构	107
5.4.3	叶尖制动	107
5.4.4	防雷系统	108
5.5	轮毂	110
5.6	变桨系统	111
5.6.1	风电机组的变桨距控制	111
5.6.2	液压变桨距系统	113
5.6.3	电动变桨系统	114
5.6.4	某机型的变桨系统参数	116
5.6.5	电动和液压驱动变桨系统优缺点比较	117

6 风电机组传动链 118

6.1	传动链布置	118
6.1.1	有齿轮箱的传动链布置	118
6.1.2	直驱型风电机组传动系统布置	120
6.1.3	“半直驱”型风电机组传动系统布置	121
6.2	主轴	121
6.3	联轴器	122
6.3.1	胀套式联轴器	123
6.3.2	万向式联轴器	125
6.3.3	膜片式联轴器	125
6.3.4	连杆式联轴器	126
6.4	齿轮箱	127
6.4.1	齿轮传动类型	127
6.4.2	轮系	128
6.4.3	风电机组中的齿轮箱	129

7 风电机组发电机 137

7.1	异步发电机	137
7.1.1	鼠笼式异步发电机	139
7.1.2	绕线式异步发电机	139
7.1.3	异步发电机并网运行	140
7.1.4	无功补偿	141
7.2	双馈异步发电机	142
7.2.1	双馈异步发电机基本结构	142
7.2.2	双馈异步发电机工作原理	143
7.2.3	双馈异步发电机冷却	144
7.3	同步发电机	144

7.3.1 电励磁同步发电机	145
7.3.2 永磁同步发电机	146

8 风电机组控制系统 148

8.1 控制系统概述	148
8.1.1 控制技术发展	148
8.1.2 控制系统的组成	149
8.1.3 控制系统的功能	152
8.2 定桨恒速风电机组控制系统	163
8.2.1 定桨恒速风电机组的工作特性	163
8.2.2 定桨恒速风电机组的发电过程控制	166
8.3 变速恒频风电机组的控制	169
8.3.1 变速恒频风电机组的控制目标	169
8.3.2 变速恒频风电机组的控制策略	170
8.3.3 变速恒频风电机组常用的控制方法	173
8.4 变流器系统	176
8.4.1 双馈异步发电机及其变流器系统	178
8.4.2 永磁同步发电机及其变流器系统	181
8.5 风电机组的并网技术	184
8.5.1 定桨恒速风电机组的软并网技术	185
8.5.2 双馈异步风电机组的并网技术	187
8.5.3 永磁同步风电机组的并网技术	189
8.5.4 风电机组对电网稳定性的影响	190
8.6 传感器	195
8.6.1 温度监控传感器	196
8.6.2 超速开关	197
8.6.3 机械振动传感器	198
8.6.4 振动保护传感器	198
8.6.5 风速传感器和风向传感器	199
8.6.6 转速传感器	200
8.6.7 编码器	200
8.6.8 位移传感器	200
8.6.9 机舱偏航位置传感器	201

9 风电机组其他系统 202

9.1 偏航系统	202
9.1.1 概述	202
9.1.2 偏航系统的主要部件	203

9.1.3 偏航控制系统 206

9.1.4 解缆和扭缆保护 207

9.1.5 偏航转速 208

9.1.6 偏航润滑 208

9.2 风电机组润滑 208

9.2.1 润滑基础 208

9.2.2 润滑分类 209

9.2.3 润滑剂 209

9.2.4 风电机组的润滑 210

9.2.5 风电增速箱润滑的特殊要求 213

9.2.6 油品使用中需要注意的问题 215

9.2.7 润滑工作的管理 216

9.3 液压系统 217

9.3.1 液压元件 217

9.3.2 定桨距风电机组的液压系统 221

9.3.3 变桨距风电机组的液压系统 223

9.3.4 液压系统的试验 229

9.4 制动系统 230

9.4.1 气动制动机构 230

9.4.2 机械制动机构 231

参考文献..... 235

风力发电发展综述

能源是推动人类社会发展的关键因素之一，人们根据能源自身的特性及开发利用的方式，将能源进行分类。按照其形成方式，可分为一次能源和二次能源。一次能源是指自然界中以天然形态存在，没有经过加工转换的各种能量和资源，如煤炭、石油、天然气及太阳能、风能、水能、地热能、海洋能、生物质能等。二次能源是由一次能源转化而来的另一种能源形式，例如，用煤发电，就是将一次能源（煤）转化为二次能源（电）。按照转化技术的不同可将能源分为常规能源和新能源两大类。常规能源是指技术上比较成熟且已被大规模利用的能源，如煤、石油、天然气及大中型水电；新能源是指以新技术和新材料为基础开发利用的能源，包括太阳能、风能、生物质能、潮汐能、地热能、氢能和核能。

根据是否可再生而循环使用的特点，还可将一次能源分为可再生能源和非再生能源。煤炭、石油和天然气等化石类能源是非再生能源，随着人类大规模开发利用，其储量日益减少，使用过程中还会对地球环境造成污染，引发温室效应等问题。在自然界可以循环再生的，如太阳能、风能、水能、海洋能、生物质能等是可再生能源。在合理开发情况下，可再生能源取之不尽、用之不竭，可以为人类社会的发展提供持续动力。通过一定的技术手段将可再生能源转换成电能，并加以利用的技术即为可再生能源发电技术。可再生能源储量丰富，往复再生，可供人类永续利用；但可再生能源能量密度低、分布不连续、有明显地域性，开发成本较化石能源高。

太阳辐射造成地球表面受热不均，引发空气流动，流动空气形成的风能可以驱动风力发电机产生电能。风能储量丰富，每年投射到地面上的太阳能高达 $1.05 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，相当于 1.3×10^6 亿 t 标准煤，其中大约 2% 转化为风能，理论上仅 1% 的风能就能满足人类对能源的需要。在所有可再生能源发电技术中，风力发电是技术较为成熟、成本相对较低廉、对环境影响小且最具开发规模和商业发展前景的能源转换技术。发展风电对于改善能源结构、保护生态环境、保障能源安全和实现经济的可持续发展等有着极其重要的意义。

1.1 早期的风能利用

1.1.1 东方风能利用史

在人类的经济发展和文明进步发展中，风能、水能和畜力起了举足轻重的作用，



每次社会发展的飞跃都离不开新的能源的发现和开发。人类对风能的利用，已有数千年的历史，在蒸汽机发明以前，风能曾经作为人类社会活动中的主要动力来源，用于船舶航行、提水灌溉、磨面锯木等。



图 1-1 古埃及的帆船

埃及被认为可能是最先利用风能的国家，约在 5 千年前，他们的风帆航船就已经在尼罗河上航行。图 1-1 是公元前 230 年在埃及尼罗河西岸建造的伊德富（Edfu）庙宇墙上的帆船雕刻。

但对于哪里是最早的风能利用装置的起源地，还有不同的看法和争论。有人相信古巴比伦国王汉莫拉比（Hammurabi，曾发布汉莫拉比法典）在公元前 1700 年曾计划用风车（古代的风能装置一般称为风车）灌溉美索不达米亚（今位于伊拉克）平原。另一些人认为最早的风车诞生地在印度，印度著名学者考底利耶（Kautiliya）在公元前 300 年写的《政事论》（Arthashastra）一书中提到了用风提水的装置。但是都没有任何记录证明这些想法曾经变为实物。

公元 644 年，古波斯人建造风车用来磨面。文字记载表明，风能在阿富汗很早就获得应用，当时的磨房建造工匠很受尊敬。直到今天，人们在伊朗和阿富汗还可以看到运行数百年的风车遗迹（见图 1-2）。古波斯风车为竖轴布置，在风叶支架上固定苇席，迎风向挡风（产生阻力），同时用墙遮住半个叶轮，叶轮的不对称受力使风阻力变成风轮的驱动力，驱动风车转动工作。

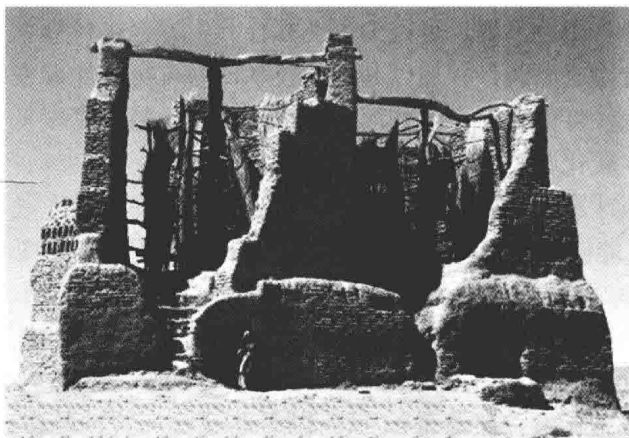


图 1-2 古波斯的风车

中国也是最早使用帆船和风车的国家之一，东汉刘熙在《释书》一书中曾写“帆泛也，随风张幔曰帆”，表明中国 1800 年前已开始利用风帆驾船。在辽阳三道壕东汉晚期的汉墓壁画上，就有风车的图样，据说距今已有 1700 多年的历史。宋朝是中国应用风车的全盛时代，当时流行的垂直轴风车一直沿用至今。唐代有“乘风破浪会有时，直挂云帆济沧海”的诗句，可见那时风帆船已广泛用于江河航运。最辉煌的风帆时代是中国的明代，



14 世纪初叶中国航海家郑和七下西洋，庞大的风帆船队功不可没。

在东南沿海，一直在使用一种立轴式风力水车，用芦席作为“帆”，将 8 个帆各自安装在一个直立的杆上，帆的正中上端则各由一绳系之，当帆席转回来时（迎风）的翻转造成不对称而产生驱动力，当地称此为走马灯式风车，如图 1-3 所示。中国这种阻力型风机大约出现在公元 1000 年，与波斯风机相比的优点是，不论风从哪个方向来都可运行。

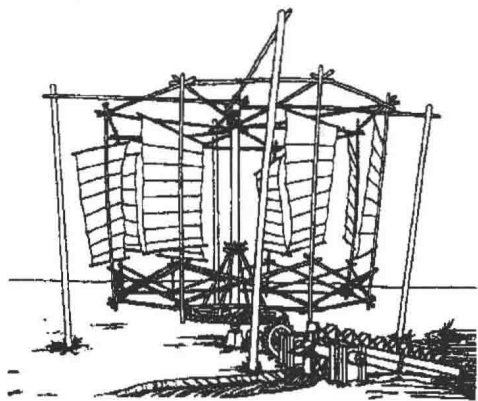


图 1-3 中国古代的风力水车

1.1.2 西方的风车

在中东发明风车很久以后，欧洲出现了另一种型式的风车。确切的资料表明欧洲最早的风车出现在 1185 年的英国，随后在 13 世纪传到荷兰、德国和波兰，到了 14 世纪传到俄罗斯。关于谁发明了这种风车，它从什么地方起源，在历史学家之间还存在争议。一种观点认为是十字军东征时从中东引进了风车，另一种观点认为是人们受水轮机技术启发，发明制造了风车。从 12 世纪到 19 世纪，水力和风力是这一时期唯一的机械能源。12~13 世纪西方国家经历了第一次机械革命，就是水轮机和风车的增多所引起的社会变化。尽管这些初级的动力机械功率很有限（水轮机功率一般为 $2 \sim 5\text{hp}$ ；风车为 $5 \sim 10\text{hp}$ ， $1\text{hp} = 745.7\text{W}$ ），但在能源供应落后的时代，却是动力显著增大的标志，为欧洲的第一次社会繁荣发挥了决定性的作用。

(1) 立柱风车 (Post Mill)：也有翻译为木马式风车，是最早出现在欧洲的风车。全部结构（传动装置和石磨）安装在一个独立垂直立柱上，四周用板材包裹，防风避雨。整个风车由一个操纵杆控制，围绕立柱转动，调整方向对风，这也是风车名称的由来。风车的叶轮轴为水平布置，通常有 4 个叶片在垂直于风向的平面上旋转，主轴上的木齿轮通过一个柱齿轮（木制）驱动石磨的垂直轴（见图 1-4）。



图 1-4 宗教书籍中的木马式风车

与中东风车明显的区别在于风轮的驱动原理。中东风车是阻力型，是利用叶面上的气



动阻力来驱动的；而水平轴风机则是靠作用在叶片上的气动升力来驱动的。当然，几百年前的风车制造者并不明白升力原理，可能是把叶轮想象成一个螺旋盘（气螺栓），气流流过时使它旋转。

(2) 空心立柱风车 (Hollow Post Mill)：随着风车的使用和推广，出现了一种改良型立柱风车，如图 1-5 所示，风车中只有一根传动轴，其余装置（传动齿轮和石磨等）都可以移出风车，风车仍然可以转动对风。这种风车可以将动力传动到风车外的水斗，驱动水斗车排涝，14 世纪起，这种风车在荷兰得到广泛应用。

(3) 塔式风车 (Tower Mill)：随着经济的发展，人们持续追求更大动力用于生产。15 世纪，在法国南部和西班牙等地中海地区，出现了塔式风车。这种风车建在一个砖砌或石砌的高大底座上，上部安装一个木制的机头，这种结构的风车可以使用更大风轮，安装在更高位置，摄取强劲稳定的风能（通常一个塔式风车的功率有 20~30hp）。沉重牢固的石头建筑避免了木马风车在大风中易倒翻的缺点，同时，塔式风车的下部结构中有更大的储存空间（见图 1-6）。

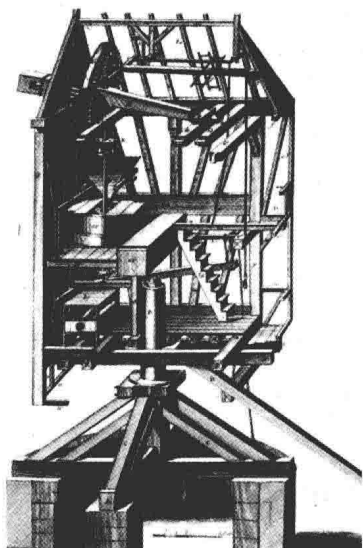


图 1-5 立柱式风车结构



图 1-6 塔式风车

当时各地的工匠根据当地的气候和自然条件不断改进风车的设计，英国西海岸大多用石头建塔身，以抵抗强风；而英国东海岸则主要用砖砌塔身；在荷兰人们采用八角木结构磨房，以适应当地潮湿松软承载力差的地面。

起初风车的机头依靠一个长到地面的尾杆控制方向（见图 1-7），稍后，通过一个链条驱动齿轮结构调整方向。1745 年，一个英国工程师艾德蒙特·李 (Edmund Lee) 发明了风车尾轮，一个安装在机头尾部、与主风轮成 90° 的小风轮，可以驱动机头自动对风。

在地中海沿海地区，因为风向稳定，人们通常建造机头位置固定的塔式风车，风轮对准主风向（见图 1-8）。



图 1-7 带尾杆的风车



图 1-8 地中海沿岸的风车

(4) 罩衫风车 (Smock Mill): 这是塔式风车的一种, 如图 1-9 所示, 其塔身通常呈八角形 (也有不少是六角形), 因外形酷似 18 世纪农民穿的一种罩衫而获此名称。塔身由木结构加木板或其他薄型板材建成, 轻盈的结构更适用于安装在不稳定的湿地, 用于抽水排灌。15 世纪, 荷兰出现了围海造田的商机, 人们尝试用风能来驱动水泵。为此, 必须对木马式风车进行改造, 以使用获取的风能来驱动位置很低的水泵, 原来的石磨换成水轮, 用于将低处的水排出海堤。



图 1-9 外形酷似罩衫的罩衫风车

风能和水能是人类发展中使用历史最久的两种能源, 在风车发展的高峰期, 全欧洲估计有 20 万台风车 (同时估计有 50 万台水车)。随着蒸汽机为代表的工业革命爆发, 作为一次能源的风能和水能开发利用逐步衰落, 被蒸汽机和内燃机替代。风能 (风车) 衰落的