



新 能 源
New Energy
应用丛书

小型风力发电 实用技术

S mall-scale Wind Power
Practical Technologies

■ 张亚彬 马丽娜 吕志友 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

013064538

新能源应用丛书

TM614

47

小型风力发电实用技术

张亚彬 马丽娜 吕志友 编著



人民邮电出版社
北京



北航

C1672095

TM614
47

882130810

图书在版编目(CIP)数据

小型风力发电实用技术 / 张亚彬, 马丽娜, 吕志友
编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013.9
(新能源应用丛书)
ISBN 978-7-115-32189-3

I. ①小… II. ①张… ②马… ③吕… III. ①风力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第122044号

内 容 提 要

本书共10章,从实际应用的角度全面地介绍了与小型风力发电系统相关的基础知识,主要涉及在离网风力发电实际应用中工程技术人员和用户需要了解和掌握的大量实际问题,包括风资源评估、设备选用、风力发电机组的安装,以及风力发电系统的调试与故障处理等,特别针对离网发电技术介绍了互补发电系统的特点与组成、运行管理、系统维护及数据采集。本书还对风力发电在分布式发电、智能电网中的应用以及风力发电应用的新领域进行了介绍。

本书内容注重实际应用,适合从事风力发电工作的技术人员以及对应用小型风力发电系统有兴趣的个人阅读,还可作为可再生能源离网发电项目的工程技术人员、相关管理人员、电站维护人员和大专院校相关专业师生的参考书。

-
- ◆ 编 著 张亚彬 马丽娜 吕志友
责任编辑 王朝辉 毕 颖
责任印制 彭志环 杨林杰
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 11.75
字数: 213千字
印数: 1—3 000册
- 2013年9月第1版
2013年9月北京第1次印刷
-

定价: 39.00元

读者服务热线: (010)67132692 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

风能作为一种清洁的可再生能源, 在我国的储藏量相当丰富。由国家气象局的资料可知, 我国离地 10m 以上风能资源总储量约 32.26 亿千瓦, 其中可开发和利用的陆地上风能储量有 2.53 亿千瓦; 50m 高度的风能资源是 10m 高度的两倍以上, 为 5 亿多千瓦; 近海可开发和利用的风能储量有 7.5 亿千瓦。

风力发电一般可分为大型风力发电、中型风力发电和小型风力发电 3 种。小型风力发电既可以并网也可以离网运行, 本书内容主要涵盖离网应用部分, 又称离网型风力发电, 是独立运行的供电系统, 即在远离电网的边远地区, 用小型风力发电机为蓄电池充电, 再通过逆变器将电能转换成交流电向负载供电, 单机容量一般在 100W~100kW。考虑到并网分布式应用是小型风力发电的主要发展趋势, 本书也介绍了小型风力发电机在并网应用方面的知识。

早在 20 世纪 70 年代, 小型风力发电技术在我国风能资源丰富的内蒙古、新疆等地就得到了发展, 最初小型风力发电技术被广泛应用于“光明工程”和“送电到乡”项目中, 用于为农牧民解决家庭或村落基本的生活用电问题。随着小型风力发电技术的完善与发展, 我国小型风力发电机组不仅可以单独应用, 还能与光伏发电互补应用, 被广泛应用于离网供电系统。近年来, 我国小型风力发电设备出口量稳步增长, 小型风力发电技术和可再生能源离网互补技术已跃居国际领先地位。

除了规模型的大型风力发电场, 离网型的小型风力发电也是我国风力发电产业发展的重要方向。为全面推动经济社会发展, 部分仍存在缺电、无电居民的地区加快了发展小型风力发电的步伐, 政府加大了解决边远地区群众用电难问题的投资力度, 有力推动了小型风力发电产业的进一步发展。小型风力发电具有适用的气候条件广泛、适宜安装的地域广阔等特点。发展小型风力发电场, 省去了铺设电缆、挖掘地基和长时间建设等投资费用, 尤其在广大无电地区以及通信、工业控制等领域, 相对于常规电力市场优势明显。我国仅内蒙古自治区, 2012 年就招标建设 20 519 套风/光互补户用发电系统, 装机容量达到 10.4MW, 投资大约 28 774 万元, 受益群众达 2 万多户。

我国风力发电等新能源发电行业的发展前景十分广阔，预计未来很长一段时期都将保持快速发展。随着我国风力发电设备的国产化，以及风/光互补发电系统等新型技术的日渐成熟，小型风力发电的成本有望再降，经济效益和社会效益不断提升，小型风力发电市场潜力巨大。小型风力发电机组相关设备制造和新技术研发得到重视和发展，风/光互补路灯、风能海水淡化等领域成为新的应用热点，市场前景看好。

本书共 10 章。首先全面介绍了小型风力发电行业的发展状况，接着分析了风力发电行业的市场现状，随后介绍了风能的概念、小型风力发电机的原理、主要设备的选择、系统的安装调试、故障分析与应急修理、风/光互补发电系统应用及新能源应用的新领域等。

本书突出实用性，主要编写人员既有充实的理论知识，又具备多年户用系统的开发实践和野外安装调试的工作经验，可为实际操作人员提供许多解决实用技术问题和实际操作问题的方法。本书把小型风力离网发电技术中出现的工作问题予以分类，理论联系实际，可供可再生能源项目工程技术人员阅读，也可作为大专院校相关专业及风力发电专业的参考资料。

本书编写人员有张亚彬、马丽娜、吕志友。其中张亚彬主要编写了第 1 章、第 8 章、第 10 章，并负责全书的统稿和组织编写工作；马丽娜主要编写了第 2 章、第 3 章（3.5 节、3.6 节）、第 5 章、第 6 章、第 7 章（7.1 节、7.2 节、7.3 节、7.4 节）；吕志友主要编写了第 3 章（3.1 节、3.2 节、3.3 节、3.4 节）、第 4 章、第 7 章（7.5 节、7.6 节、7.7 节）、第 9 章。

在本书的写作过程中，高援朝教授在编写前期做了大量的组织工作，并提供了丰富的参考资料，帮助我们完成书稿。都志杰教授作为本书的审稿人，对本书的编写完成也给予了很大的帮助，在编写初期对目录、结构的安排给出了很多建设性的意见，编写期间也提供了很多资料和关键技术支持，完稿后又多次审阅，提出详尽的修改意见。

本书还得到了中国科学院电工研究所的陈东兵教授、俞妙根教授、胡书举教授、李斌教授、尚永红教授、刘华利老师等的大力帮助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，敬请广大读者批评指正。

第1章 小型风力发电产业现状和应用前景	1
1.1 小型风力发电简介	1
1.1.1 小型风力发电的定义	1
1.1.2 小型风力发电的主要应用方式	1
1.1.3 小型风力发电的技术特点	5
1.1.4 小型风/光互补发电潜在市场	6
1.1.5 我国小型风力发电产业存在的问题	7
1.2 国内外小型风力发电产业现状	7
1.2.1 全球小型风力发电机安装量统计	8
1.2.2 小型风力发电机主要应用市场	10
1.2.3 市场驱动因素	14
1.2.4 市场预测	16
1.3 我国小型风力发电应用现状和前景	17
1.3.1 我国小型风力发电行业现状	17
1.3.2 发展我国小型风力发电产业的有利条件	18
1.3.3 我国小型风力发电市场现状	19
第2章 风能和风资源评估	21
2.1 风的基本概念及分类	21
2.1.1 风	21
2.1.2 风的分类	22
2.2 风的主要参数	23
2.2.1 风速	23
2.2.2 风向	24

2.2.3	常用风速单位及相互间的转换	27
2.2.4	风级	27
2.3	风能相关的主要参数	30
2.3.1	风能密度	30
2.3.2	平均风能密度	30
2.3.3	有效风能密度	30
2.3.4	风频和风频分布	31
2.4	风和风能的其他特征	32
2.4.1	气流特征和局部地形对风速的影响	32
2.4.2	风切变	34
2.4.3	紊流和扰动	36
2.5	我国的风能分布	36
2.5.1	主要风带	36
2.5.2	影响我国风能资源的主要因素	37
第3章	风力发电系统的组成及工作原理	39
3.1	风力发电机的种类	39
3.1.1	水平轴风力发电机	39
3.1.2	垂直轴风力发电机	40
3.2	发电系统的组成及工作原理	41
3.2.1	系统组成	41
3.2.2	工作原理	42
3.3	充放电控制器	45
3.3.1	控制器的功能	46
3.3.2	控制器工作原理	47
3.4	蓄能设备	52
3.4.1	铅酸蓄电池	53
3.4.2	镉镍电池	57
3.4.3	锂电池	58
3.5	逆变设备	60
3.5.1	逆变器工作原理	60
3.5.2	逆变器的主要技术参数	61
3.5.3	逆变器种类	64
3.6	系统负载	66

3.6.1	直流负载和交流负载	66
3.6.2	负载特性	67
3.6.3	负载用途	68
第4章	小型风力发电系统及主要设备的选择	70
4.1	风资源对发电机组的影响	70
4.2	负载对风力发电机组的影响	71
4.3	选择风力发电机组的因素	72
4.4	蓄电池的选择	75
4.5	控制器及逆变器的选择	77
4.5.1	控制器	77
4.5.2	逆变器	78
4.6	风力发电机组运行方式的确定	81
4.7	应用实例与优化	82
第5章	小型风力发电机组的安装	84
5.1	风力发电机组安装位置	84
5.1.1	不同地形的现场特点	84
5.1.2	风力发电机组安装位置的选定	86
5.1.3	多台风力发电系统中的风力发电机布局	86
5.2	塔架基础的制作要求	88
5.3	风力发电机组的地面组装	90
5.4	塔架的组装方法及安装注意事项	93
5.4.1	塔架安装时的注意事项	94
5.4.2	拉索塔的组装	95
5.5	不同塔架的立机方法及注意事项	96
5.5.1	拉索塔的立机方法及注意事项	96
5.5.2	单柱塔的立机方法及注意事项	97
第6章	小型风力发电系统的调试与运行	99
6.1	风力发电机组安装后的检查与试运行	99
6.2	风力发电机组安装后的验收	100
6.3	风力发电机组控制器的调试	101
6.4	风力发电机组的运行维护与保养	102

6.4.1	风力发电机组运行维护的基本原则和要求	102
6.4.2	风力发电机组的维护与检修规定和注意事项	102
6.4.3	风力发电机组的例行巡检和检查内容	103
6.4.4	风力发电机组定期维护与检修的一般要求	103
6.4.5	风力发电机组定期维护与检查的项目	104
6.5	风力发电系统的运行安全	105
6.5.1	安全概述	105
6.5.2	基本安全信息	106
6.5.3	现场安全须知	108
第7章	常见故障的分析与处理方法	110
7.1	风力发电机组的常见故障及处理方法	110
7.2	充电控制器/逆变器的常见故障与检查内容	112
7.2.1	充电控制器的常见故障	112
7.2.2	逆变器的常见故障与常规检查内容	112
7.3	蓄电池的故障与处理方法	113
7.4	局域电网的常见故障、原因和处理方法	116
7.5	影响系统效率的因素	118
7.5.1	测量风力发电机的输入功率和输出功率	118
7.5.2	风力发电机效率	120
7.5.3	风能利用系数与整机效率	121
7.5.4	海拔高度对效率的影响	121
7.5.5	风力发电机安装高度对效率的影响	122
7.5.6	多台风力发电机安装布局对效率的影响	122
7.6	提高系统效率的方法	123
7.6.1	发电机效率	123
7.6.2	蓄电池效率	124
7.6.3	充电控制器效率	124
7.6.4	合理的机组维护也是提高效率的方法	124
7.7	提高逆变器使用效率的方法	125
第8章	新能源互补发电系统	126
8.1	互补发电系统的种类与特点	126
8.1.1	互补发电系统的意义	126

8.1.2 互补发电系统的原则与分类	126
8.1.3 光伏发电简介	127
8.1.4 风/光互补发电系统	133
8.2 风/柴互补发电系统	136
8.2.1 直流母线型风/柴互补发电系统特点	137
8.2.2 交流母线型风/柴互补发电系统特点	138
8.3 风/光/柴互补发电系统	140
8.3.1 风/光/柴互补发电系统的组成	140
8.3.2 互补发电设备的使用安全	142
8.4 互补发电系统检测与评价	142
8.4.1 检测与评价的目的	142
8.4.2 风/光互补发电系统需要采集的参数	143
8.4.3 采集数据需要的设备	144
8.4.4 数据分析方法及评估	147
第9章 小型风力发电系统的应用	148
9.1 户用独立供电系统	148
9.2 乡、村集体独立供电系统	149
9.3 工业、企业、事业单位独立供电系统	152
9.4 部队用电	152
9.5 移动通信、养殖、道路(森林)监测等应用	153
9.6 风/光互补路灯	154
第10章 小型风力发电应用的新领域	156
10.1 分布式发电	156
10.1.1 分布式发电概念	156
10.1.2 分布式电源分类	157
10.1.3 分布式供电系统	161
10.1.4 发展分布式发电的意义	163
10.2 智能电网	164
10.2.1 智能电网概念	164
10.2.2 建设智能电网的必要性	166
10.2.3 智能电网是接纳新能源分布电源的高速公路	168
10.3 风能海水淡化	170

10.3.1	海水淡化简介.....	170
10.3.2	海水淡化原理.....	171
10.3.3	风能海水淡化.....	173
10.3.4	风能海水淡化的前景.....	175
参考文献.....		177

小型风力发电产业 现状和应用前景

1.1 小型风力发电简介

1.1.1 小型风力发电的定义

国际电工委员会(IEC)针对小型风力发电机组的最新标准 IEC 61400-2 定义的小型风力发电机组(Small Wind Turbine, SWT),适用于风轮扫掠面积小于 200m^2 ,将风能转换为电能(产生的电压低于交流电压 $1\,000\text{V}$ 或低于直流电压 $1\,500\text{V}$ 的小型风力发电机),这相当于单机功率为 $40\sim 50\text{kW}$ 。目前,世界各国在进行市场研究、起草可再生能源法律或制订财政援助计划等项目时,都建立了他们自己对于小型风力发电机的定义。在 5 个主要小型风力发电机制造国家的定义中,小型风力发电机最大容量范围的差异在 $15\sim 100\text{kW}$ 之间变化。例如在英国,由于各方的兴趣不同,小型风力发电机的定义甚至在国家风能协会、英国可再生能源和 MCS 认证机构之间都有所不同。

目前,关于小型风力发电机最高容量的规定倾向于 100kW ,这主要是由北美和欧洲市场所主导的。在过去的几十年中,我们观察到小型风力发电机的容量在增加。这主要是由人们对较大的并网发电系统的兴趣逐渐增加,独立系统的市场相对逐渐缩小引起的。然而,为了创建一个标准化的和健全的小型风力发电机市场,对于小型风力发电机的定义应该达成一致。根据大多数国际组织的定义,把功率小于 100kW 的风力发电机组定义为小型风力发电机组(也有的把几十千瓦的风力发电机组称为中型风力发电机组)。本书把功率不超过 100kW 的风力发电机组称为小型风力发电机组。

1.1.2 小型风力发电的主要应用方式

小型风力发电的主要应用方式可以分为两大类:离网型和并网型。

1. 小型风力发电的离网型应用

所谓离网型供电是指不依赖现有电网而进行独立发电的供电方式。这种发电系统都建立在传统电网不能延伸到的地方，从而解决了这些地区的用电问题，同时加快了该地区经济社会的发展，并提高了人民生活水平。随着人们对可再生能源认识的提高，利用可再生能源进行离网独立发电的技术得到了飞速发展。

小型风力发电的离网型应用，主要分为独立风力发电系统、风/光互补发电系统、风/柴互补发电系统和风/光/柴互补发电系统等。

独立风力发电系统是由单一的发电设备——风力发电机组成的独立供电系统，通常包括风力发电机、控制器、蓄电池、逆变器、耗能负载及配电设备等，如图 1-1 所示。

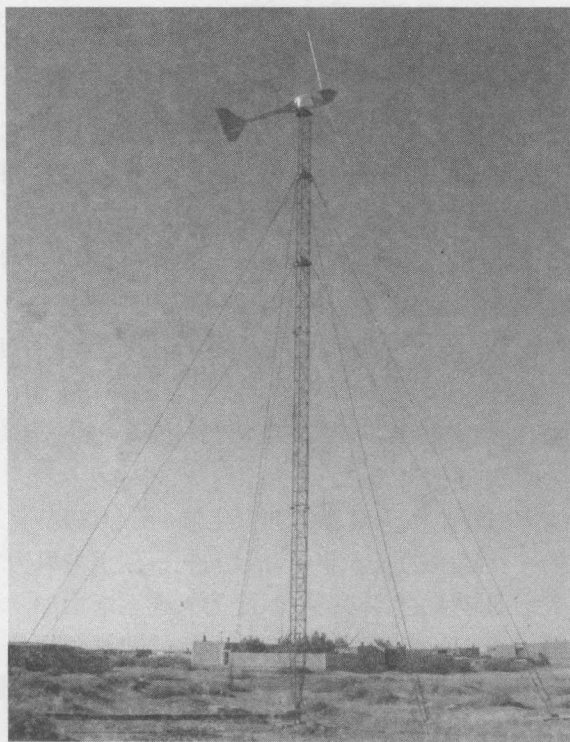


图 1-1 独立风力发电系统

风/柴互补发电系统一般由风力发电机组、柴油发电机组、储能装置、控制系统、逆变器、耗能负载等附件组成，如图 1-2 所示。此类系统还可分为直流母线型和交流母线型两种类型。

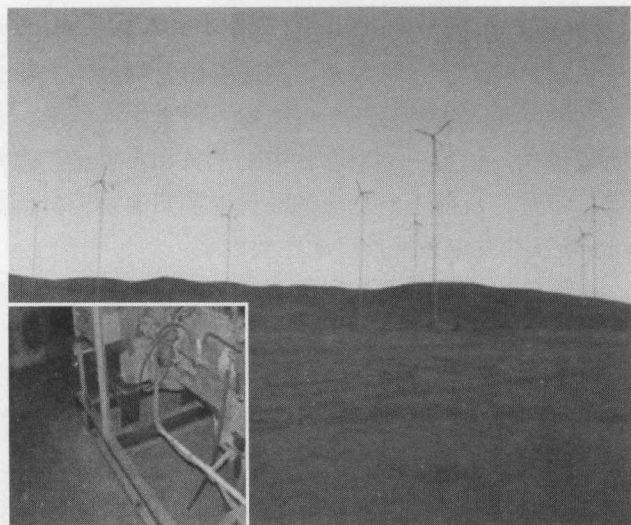


图 1-2 风/柴互补发电系统

风/光互补发电系统是将风力发电机组和光伏发电结合起来的发电系统,如图 1-3 所示,其一般由风力发电机、太阳能光伏阵列、风力发电机控制器、光伏控制器、逆变器、蓄电池组等组成。以小型风力发电机组为主的风/光互补发电系统是最合理的独立电源,在很多应用领域已具备和常规能源竞争的条件。风/光互补路灯及照明系统技术已日趋成熟,具备了推广应用的条件。风/光互补发电系统的应用,一方面很好地实现了能源的互补性,极大地提高了系统的供电品质;另一方面提高了系统的使用率,降低了成本,具有很好的社会效益和经济效益。



图 1-3 安装在青海阳康乡的风/光互补发电系统

风/光/柴互补发电系统由风力发电机组、太阳电池方阵、蓄电池组、逆变器、控制器和柴油发电机组等组成。在系统中,柴油机组常常被用来作为后备动力以补充可再生能源资源的不足。这种系统不仅能够为日常生活供电,而且还能为一些小型的生产性负载供电,如用于小型农牧电动工具和农牧机具维修,为居民和牲畜提取饮用水等。但是,目前不断上涨的油价以及柴油发电机所需的大量维护工作,是影响风/光/柴互补发电系统推广的主要因素。

2. 小型风力发电的并网型应用

可再生能源并网发电,或称分布式发电,指的是在用电现场或靠近用电现场(用户终端)配置较小的发电设备(一般低于30MW),以满足特定用户的需要,支持现存配电网的经济运行,或者同时满足这两方面的要求。

可再生能源并网发电是当前清洁能源和环保措施中发展最快的领域之一,它也为电力用户降低电费支出提供了可能性。过去风力发电机成本远比太阳能低,人们普遍采用的小型发电设备主要是小型风力发电机。因此,并网型的风力发电技术被广泛应用,如图1-4所示。近年来,太阳能光伏电池的价格急剧下降,太阳能光伏分布式发电也迅速发展了起来。



图 1-4 张北并网型小型风力发电机的应用

小型风力发电机作为分布式电源需满足4个边界条件：①风资源（风速）不低于4m/s（测量高度10m）；②有可以接入的电网；③有一定的负载；④有一定面积的安装场地（与大型风力发电机相比，小型风力发电机对场地的要求非常低），甚至可以安装在建筑物的侧面或屋顶上。

在“分布式发电”模式下，用电设备可由风力发电和电网同时供电。当风力足够大、发电机组发出的电量足够时，负载完全由风力发电机组供电，多余的电量还可以出售给电力公司；当风速较低、风力发电机组输出的电力不能满足负载用电需要时，负载由风力发电机和电网同时供电；当风速低于切入风速时，风力发电机没有输出，所有的电力全部来自于电网。所有这一切都是自动进行的。这类系统无需储能设备，因为不提供后备电力供应，当电网因任何原因停止供电时，风力发电机也自动关闭。

1.1.3 小型风力发电的技术特点

小型风力发电机组一般由下列几部分组成：风轮、发电机、调速和调向机构、停车机构、塔架及其附件、地锚等。

小型风力发电机的技术特点如下所述。

① 风机叶片一般为2~3个，少数为4~6个，且叶片的结构形式和制造方法多样。

② 配以尾翼、塔架、底座、地锚和拉索（单柱塔没有拉索）。

③ 发电机选配具有低速特性的永磁发电机。永磁材料使用铁氧体或稀土材料，使发电机的效率从普通发电机的0.50提高到现在的0.75以上，有些可以达到0.82。

④ 多数小型风力发电机组采用被动式侧偏调速保护，风轮的最大功率系数已从初期的0.30左右提高到0.38~0.42，且启动风速较低。

⑤ 根据风轮的迎风方式可分为上风型（带尾翼）或下风型（无尾翼）。小型风力发电机组的调向装置大部分是上风向尾翼调向。

⑥ 根据风力发电机轴，小型风力发电机组分为水平轴型或垂直轴型，如图1-5所示。水平轴型的风力发电机组的风轮旋转轴与地面基本保持平行，垂直轴型的风力发电机组的叶轮旋转轴与地面基本保持垂直。

⑦ 叶片材料多样化，包括木质、铁质、铝合金、玻璃钢复合型和全尼龙型等。

⑧ 风轮采用定桨距和变桨距两种，其中以定桨距居多。

⑨ 调速装置采用风轮偏置和尾翼铰接轴倾斜式调速、变桨距调速机构或风轮上仰式调速。功率较大的机组还装有手动制动或电磁制动机构，以确保风力发电机在大风或极端风况下的安全。

⑩ 小型风力发电机组的单机功率主要从几百瓦到几十千瓦，适用范围广；机组运行平稳、质量可靠，设计的使用寿命一般为15~20年。

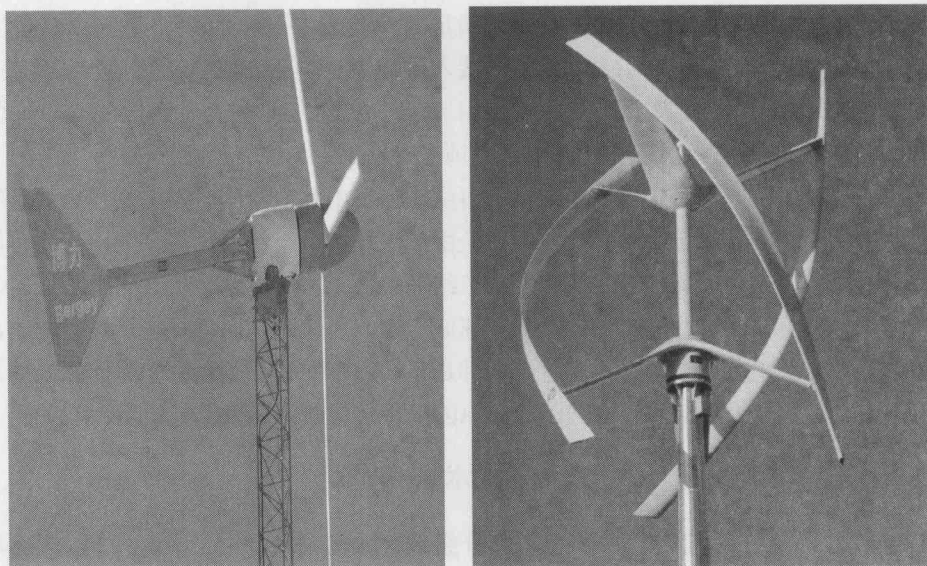


图 1-5 水平轴型和垂直轴型风力发电机组

⑪ 小型风力发电机的体积小、重量轻，便于安装和运输。

1.1.4 小型风/光互补发电潜在市场

风/光互补发电不仅克服了单一形式发电的间歇性、时段性、不稳定性等缺点，而且还弥补了单一形式发电量不足、蓄电池寿命短和供电系统可靠性差等弱点，同时解决了经济上的互补问题。因此，风/光互补发电是当前和今后解决无电地区居民用电和工商业用电的主要应用形式之一。除无电地区大力推广应用外，风/光互补发电在城乡路灯和通信基站用电工程等方面也发展迅速。如内蒙古计划推广 5 万套新能源通电建设工程，全部采用风/光互补发电系统。2011 年在无电地区新能源通电建设工程风/光互补发电系统宣布采购招标公告，国内有 6 个企业中标 13 000 多套新能源工程的风电材料设备。

我国中小型风能产业潜在市场如下。

- ① 无电地区电力建设：西部边远地区的农牧渔民生活、生产用电。
- ② 城乡照明：城镇街道和屋顶照明、乡镇道路路灯、高速公路路灯。
- ③ 通信领域：通信基站（中国电信、移动、联通）。
- ④ 工业领域：石油开采、铁路小站、输油管道、气象台、森林防火瞭望台、海水淡化。
- ⑤ 商业领域：户外广告、海上航标灯、高速公路摄像头、庭院灯、草坪灯。
- ⑥ 水上运输：内河、湖泊、沿海渔船和油船。