



可再生能源 离网独立发电技术与应用

(风能/光伏发电篇, 教师用书)

中国国家能源局

“中欧能源和环境项目”支持中国西部无电地区电力建设中的人才培训项目组
(EU-China Energy and Environment Programme)

都志杰 主编



化学工业出版社

可再生能源 离网独立发电技术与应用

(风能/光伏发电篇, 教师用书)

中国国家能源局

“中欧能源和环境项目”支持中国西部无电地区电力建设中的人才培训项目组
(EU-China Energy and Environment Programme)

都志杰 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

Disclaimer

This publication has been produced with the assistance of the European Union. The contents of this publication are the sole responsibility of the team of the project “EU-China Energy and Environment Programme, Development Support for Sustainable Rural and Renewable Energy Training in China”, and can in no way be taken to reflect the views of the European Union.

声 明

本出版物的出版得到了欧盟的支持。“中欧能源与环境项目”的“支持中国农村可再生能源可持续培训”课题组对本书的内容负责。本书不代表欧盟的观点。

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源离网独立发电技术与应用. (风能/光伏发电篇) 都志杰主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 8
教师用书
ISBN 978-7-122-06001-3

I. 可… II. 都… III. ①风力发电-研究-中国②太阳能发电-研究-中国 IV. TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 099588 号

责任编辑: 王 斌 伍大维
责任校对: 李 林

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 490 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

编委会名单

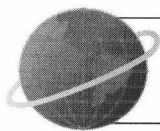
顾问：史立山 Frank Haugwitz

主编：都志杰 (Charlie Dou)

副主编：王斯成 许洪华 吕芳

参编人员：(按姓氏拼音排序)

陈振斌	郝国明	江燕兴	刘杰	罗路佳	马丽云
申彦波	王锴	王薇	王文静	席东民	杨振斌
袁春红	曾祥斌	张先谋	周庆申	朱力	朱瑞兆



序

解决无电人口的用电问题历来是中国政府的工作重点，虽然中国在过去的几十年中取得了经济和基础建设的飞速发展，但至今约有 1200 万人口未能得到电力服务，目前中国的无电人口大部分分布在偏远的西部地区。

为了给这些地区带来电力服务，中国政府曾开展过多个无电地区电力建设项目和国际合作项目，如西藏无电县建设，光明工程先导项目，“送电到乡”工程，中国-荷兰“丝绸之路”计划，世界银行 REDP 项目，UNDP 加速可再生能源商业化能力建设项目，中-德合作 GTZ、KFW 项目，中-日合作项目，中-加合作项目等。以 2002 年启动的“送电到乡”工程为例，国家投入了 47 亿元人民币，用可再生能源离网独立发电技术，解决了 989 个乡镇政府所在地的用电问题。如此大规模的项目不但要求所有的系统应当高质量地建设，而且能够长期可靠地运行。实践表明，可再生能源离网独立系统安装完成后的运营管理、运行维护和售后服务是此类项目的最大挑战，中国政府正在着手解决可再生能源离网独立供电项目对技术服务、能力建设、管理体制、人才培训和政策支持等关键问题。

根据中国政府的目标，在今后的几年中农村可再生能源产业会得到很大的发展，从而要求大量合格的农村能源服务产业的从业人员。这一从业人员的数字，估计到 2010 年为 3 万人，到 2015 年为 14 万人，而到 2020 年，需求可能会达到 22 万人。因此从现在开始，就亟需投入农村能源服务培训的设施建设并建立完善的综合性培训体系，以满足即将出现的新能源离网独立供电产业对人才乃至专业人才的需求。

“中国-欧盟能源和环境项目”正是在这样的背景下，由中国政府和欧盟为强化双边在能源可持续发展的领域中进行合作的项目。项目的中方执行机构是中国国家发改委、国家商务部、能源研究会、国家科技部和中石油。项目于 2003 年 5 月 24 日正式启动，原计划于 2008 年 5 月 23 日结束，现已延期至 2009 年 11 月 23 日。

项目的总体目标是通过促进可再生能源的利用、改善能源效率和发展天然气市场来促进可持续的能源发展，从而对改善中国的社会、经济和环境条件做出贡献，并进一步强化中国和欧盟各成员国之间在工业和能源方面的合作。项目同时还将推动有关方面的技术转让和投资。

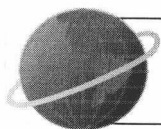
项目的内容包括四个方面：①能源政策建设；②改善能源效率；③增加可再生能源的利用；④增加天然气的利用。

可再生能源项目主要具体活动将集中在以下四个方面：①加强政策建设能力；②开发中国农村的沼气资源；③发展海上风资源的研究；④支持中国西部无电地区电力建设中的人才培训。

本教材是针对第四个课题而编写的，是“中国-欧盟能源和环境项目”的主要成果之一。相信本教材的成功编写和出版将对中国无电地区电力建设中的人才培训提供有力的支持，并必将卓有成效地推动可再生能源在中国无电地区的推广和应用！

(史立山)

中国国家能源局



前 言

本教材是“中欧能源和环境项目”中的第四个子项目“支持中国西部无电地区电力建设中的人才培养”的主要工作内容之一。项目由德国 GTZ-IS 牵头，北京计科电可再生能源技术开发中心、欧洲 ISPQ 培训资格认证、甘肃汇能新能源公司等为项目的合作单位。王斯成先生担任专家组组长，并和中科院电工所副所长许洪华先生、都志杰（Charlie Dou）先生一起，成为课题组的核心专家。

本子项目的目的是：发展系统的、综合的培训概念，用以支持中国西部的可持续的可再生能源离网独立发电系统的持续运行；在北京建立农村能源和可再生能源培训中心，并在此基础上在中国西部有关省、自治区建立培训分中心；根据中国可再生能源中长期规划目标，制定相应的人才培养中长期战略和计划；编写培训材料，丰富培训资料库；为各省自治区的分培训中心提供必要的师资培训、培训资格认证等能力建设。

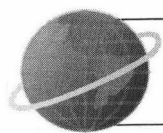
本教材是根据这一需求组织编写的，是子项目的一个有机组成部分，是这一子项目的重要成果之一。

教材共分 16 章，分别是：

- 第 1 章 可再生能源基础
- 第 2 章 风能和风资源评估
- 第 3 章 风力发电技术
- 第 4 章 太阳辐射原理和太阳能资源
- 第 5 章 太阳能光伏发电技术
- 第 6 章 储能蓄电池
- 第 7 章 充放电控制器
- 第 8 章 直流-交流逆变器
- 第 9 章 可再生能源互补系统
- 第 10 章 交流配电和局域电网
- 第 11 章 户用系统
- 第 12 章 风能太阳能社区供电系统设计
- 第 13 章 风能太阳能发电系统的安装和试运行
- 第 14 章 风能太阳能发电系统的运行和维护保养
- 第 15 章 风能太阳能发电系统的故障诊断及处理
- 第 16 章 风能太阳能发电系统及电站安全

本教材同时出版教师用书和学员用书。

本书编委会
2009 年 6 月



致 谢

本教材是在“送电到乡”中涌现出来的培训教材和相关产业专业知识的基础上编写而成的。在本项目的实施和本教材的编写过程中，得到了中国政府各有关部门和中欧项目办的有关官员的大力支持。

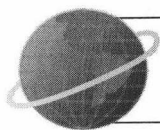
非常感谢国家能源局新能源司副司长史立山先生对整个项目的支持、关心和基于对中国整个无电地区电力建设高瞻远瞩基础上的具体指导；感谢欧盟项目办对课题在目标、资金、和进度上的支持，尤其是 Frank Haugwitz 先生，出于他对中欧社会、经济和文化的特点和差异的了解，在项目的实施过程中做了大量的协调工作；感谢课题组组长王斯成先生，他以他对可再生能源产业的渊博知识和敬业精神，领导了整个课题的实施和教材的编写；感谢中科院电工所和北京计科电可再生能源技术开发中心的全体人员，尤其是许洪华副所长、助理吕芳女士和陈振斌教授，没有中科院电工所和北京计科电可再生能源技术开发中心的鼎力支持，项目的圆满实施和教材的成功编写是不可能的。

本教材由都志杰 (Charlie Dou) 担任主编。在本教材的编写过程中，参考了北京计科电可再生能源技术开发中心，北京市计科能源新技术公司，新疆新能源股份有限公司，内蒙古华德新技术公司，青海光明工程有限公司编写的培训教材，在这里，谨向这些单位表示诚挚的感谢！

需要指出的是，在本教材试用过程中相关领域的各有关专家教授贡献了宝贵的专业知识，他们是：中国气象科学研究院朱瑞兆教授和袁春红、杨振斌先生（风能资源评估），国家气候中心/中国气象局风能太阳能资源评估中心申彦波先生（太阳能资源评估），课题组组长、北京市计科新能源技术开发公司王斯成先生（太阳能光伏发电和产业发展趋势），中科院电工所王文静博士（太阳能光伏产业的发展趋势）；圣阳集团周庆申先生（蓄电池），华中科技大学曾祥斌教授（蓄电池），陕西新通智能科技有限公司罗路佳副总（风能/太阳能控制器），北京科诺伟业科技有限公司张先谋高工（交流逆变器），德国 SMA 公司驻华首席代表刘杰先生（新型逆变器），内蒙古工业大学席东民副教授（局域电网），北京科诺伟业科技有限公司江燕兴副总（可再生能源电站安装），甘肃汇能新能源公司郝国明先生（可再生能源电站运行维护、故障诊断和电站安全）。这些资料无论是在理论上还是实际上都极大地丰富和充实了本教材的内容，在此向所有上述专家、教授和培训老师表示由衷的感谢！

内蒙古工业大学刘志璋教授、国家发改委能源所王斯成、中国气象科学研究院杨振斌和申彦波、山东圣阳电源有限公司周庆申、陕西新通智能科技有限公司罗路佳、合肥阳光电源有限公司曹仁贤、内蒙古工业大学席东民分别审阅了本书中的可再生能源基础和风力发电部分、太阳能光伏发电部分、风力资源评估、太阳能资源评估部分、蓄电池部分、控制器部分、逆变器部分和交流配电和局域电网。上述专家学者的审阅使本教材在内容上更为翔实，结构上更为严谨。课题组借此机会向所有参与审阅的专家教授致谢！

课题组还要感谢北京计科电可再生能源技术开发中心的马丽云小姐、北京远东博力风能设备有限公司的马丽娜女士、梁艳琴女士和赵春亚女士在组织协调、资料收集中付出了巨大的劳动，课题组对她们的辛勤工作给予高度评价！



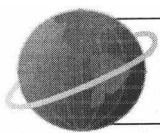
目 录

第 1 章 可再生能源基础	1	2.5.2 具体判断分析风力发电机的选址	36
1.1 可再生能源	1	2.5.3 气象站的风资源数据	37
1.1.1 可再生能源概述	1	2.5.4 风向数据对中小型离网风力发电	
1.1.2 常用的可再生能源	1	机应用的意义	37
1.2 可再生能源发电技术及其基本分类	2	2.5.5 小规模离网发电时的风资源评估	38
1.3 可再生能源离网发电	4	习题	40
1.3.1 可再生能源离网发电的主要应用	4	第 3 章 风力发电技术	41
1.3.2 可再生能源并网发电和离网发电		3.1 风力发电基本原理	41
的主要区别	6	3.2 风力机主要类型与结构	41
1.4 发展可再生能源离网发电的意义	7	3.2.1 风力发电机类型	41
1.4.1 社会效益	7	3.2.2 小型风力发电机组的分类	43
1.4.2 可再生能源离网发电的经济效益	9	3.3 风力发电机组工作原理和特性	45
1.4.3 可再生能源离网发电的环境		3.3.1 小型风力发电机组工作原理	45
效益	10	3.3.2 小型风力发电机组的基本组成	45
1.5 风能、光伏发电产业现状和前景	11	3.3.3 风力机的输出功率	53
1.5.1 风能发电产业现状和前景	11	3.4 独立运行的风力发电机组	55
1.5.2 光伏发电产业现状和前景	14	3.4.1 风力发电机组的运行	55
习题	16	3.4.2 独立运行风力发电机组	55
第 2 章 风能和风资源评估	17	3.4.3 风力发电机组性能评价	56
2.1 风能基础	17	3.4.4 独立运行风力发电系统的特点	58
2.1.1 风	17	3.5 多台风力发电机组组成的风力发电	
2.1.2 描述风力的主要参数	18	系统	58
2.1.3 风能	23	3.6 风力发电系统的主要应用	59
2.1.4 风和风能的其他特征	26	习题	64
2.2 我国的风能分布	28	第 4 章 太阳辐射原理和太阳能资源	65
2.2.1 中国的风能分布	28	4.1 太阳辐射的基本概念	65
2.2.2 主要风带	28	4.1.1 基本概念	65
2.2.3 影响中国风能资源的主要因素	30	4.1.2 符号及定义	67
2.3 风能的主要特点	31	4.2 太阳辐射的基本定律	67
2.3.1 风能的优点	31	4.2.1 直散分离原理	67
2.3.2 风能的缺点	32	4.2.2 布格-朗伯定律 (Bouguer-Lambert	
2.4 风资源测量和评估	32	Law)	68
2.4.1 风能资源评估方法	32	4.2.3 余弦定律	68
2.4.2 风资源测量和评估程序	33	4.3 太阳能电池方阵不同运行方式的数学	
2.4.3 风资源评估的重要性	34	模型	70
2.5 风力发电机选址	34	4.3.1 太阳能电池方阵面上辐射量的	
2.5.1 风力发电机选址的原则	35	计算	70

4.3.2 地平坐标系数学模型	70	6.5.2 确定蓄电池组的储电容量	113
4.3.3 赤道坐标系数学模型	71	习题	115
4.4 太阳能电池方阵面所接收到的太阳 辐射的计算	73	第7章 充放电控制器	116
4.5 中国的太阳能资源	75	7.1 充放电控制器的功能	116
4.5.1 世界太阳能资源及基本分布	75	7.2 蓄电池过放电保护基本原理	118
4.5.2 我国太阳能资源及基本分布	75	7.2.1 铅酸蓄电池放电特性	118
4.5.3 太阳能资源的测量	78	7.2.2 常规过放电保护原理	119
4.6 太阳能光伏电站选址和定位	80	7.2.3 蓄电池剩余容量控制法	119
4.6.1 确定方位角	80	7.2.4 蓄电池剩余容量 (SOC) 的数学 模型	120
4.6.2 确定倾角	81	7.2.5 蓄电池剩余容量 (SOC) 放电过 程控制	122
4.6.3 场地日照条件评价	82	7.3 充放电控制器的基本技术参数	123
习题	83	7.4 充放电控制器的分类	123
第5章 太阳能光伏发电技术	84	7.5 可再生能源充电控制器的基本电路 与工作原理	124
5.1 太阳能电池组件及方阵	84	7.5.1 单路并联型充放电控制器	124
5.1.1 太阳能电池组件的 $I-V$ 特性和相 关参数	85	7.5.2 串联型充放电控制器	125
5.1.2 温度和辐照度对太阳能电池组件 输出特性的影响	86	7.5.3 脉宽调制 (PWM) 三阶段充电 控制器	125
5.1.3 太阳电池的“热斑效应”	86	7.5.4 带最大功率跟踪电路 (MPPT) 型充电控制器	126
5.2 太阳能光伏发电系统的主要应用	89	7.5.5 智能型控制器	129
习题	98	7.6 风力发电系统控制器输入端的整流 部分	131
第6章 储能蓄电池	99	7.6.1 蓄电池稳压型风能控制器的工 作原理	132
6.1 蓄电池的应用	99	7.6.2 AC-DC 风能控制器的原理和 特点	132
6.1.1 蓄电池在可再生能源离网发电 中的应用	99	7.7 其他太阳能供电系统充电控制器	133
6.1.2 常用蓄电池类型	99	7.7.1 多路控制器 (蓄电池稳压模 式)	133
6.1.3 蓄电池的命名方法、型号组成 及其代表意义	103	7.7.2 最大功率跟踪型控制器 MPPT	133
6.2 铅酸蓄电池	103	习题	137
6.2.1 铅酸蓄电池结构及工作原理	103	第8章 直流-交流逆变器	138
6.2.2 阀控密封式铅酸蓄电池 (VRLA) 的基本结构和工作原理	105	8.1 可再生能源供电系统对逆变器的 技术要求	138
6.3 铅酸蓄电池主要性能及影响因素	107	8.2 逆变器的分类和电路结构	139
6.3.1 蓄电池容量	107	8.2.1 逆变器的基本电路	139
6.3.2 蓄电池使用寿命	109	8.2.2 电力电子器件的分类	140
6.3.3 蓄电池效率	111	8.3 常见逆变器交流输出类型	140
6.4 蓄电池的选择	111	8.3.1 方波逆变器	140
6.4.1 可再生能源独立供电系统对储 能蓄电池的要求	111	8.3.2 阶梯波逆变器	140
6.4.2 选择蓄电池类型	112		
6.5 蓄电池组	112		
6.5.1 蓄电池的串联、并联和蓄电 池组	112		

8.3.3	正弦波逆变器	141	10.3.2	可再生能源交流配电装置的技术要求	163
8.3.4	并网型逆变器	141	10.3.3	可再生能源交流配电装置的其他要求	164
8.3.5	几种功率转换电路的比较	141	10.4	低压配电线路	164
8.4	逆变器的控制电路	143	10.4.1	导线类型简介	164
8.5	逆变器的保护电路	144	10.4.2	确定导线截面	165
8.6	逆变器检测电路	144	10.4.3	选择导线类型	165
8.7	逆变器的显示与通信	144	10.4.4	低压配电线路的其他组成部件	165
8.8	逆变器功率器件的选择	144	10.5	接地和防雷	166
8.9	逆变器的主要技术性能指标	145	10.5.1	雷击的危害	166
	习题	146	10.5.2	可再生能源离网独立供电系统的防雷措施	166
第9章	可再生能源互补系统	147	10.5.3	可再生能源离网独立供电系统的接地要求	167
9.1	可再生能源互补系统概述	147	10.6	低压配电	168
9.1.1	开发可再生能源互补发电系统的意义	147	10.6.1	总配电盘	168
9.1.2	互补系统的分类	147	10.6.2	定时控制配电盘	169
9.2	风光互补发电系统	148	10.6.3	户用配电盘	169
9.2.1	风光互补发电系统组成	148	10.7	用户负载	170
9.2.2	风光互补发电系统的合理配置	149	10.7.1	电阻性负载	170
9.3	风柴互补发电系统	149	10.7.2	感性负载	171
9.3.1	直流总线型风柴混合发电系统	150	10.7.3	典型负载应用	171
9.3.2	交流总线型风柴混合发电系统	151		习题	172
9.4	风光柴互补发电系统	153	第11章	户用系统	173
9.5	风水互补系统	154	11.1	专门设计的户用系统	173
9.5.1	风水互补系统概念	154	11.2	商品化户用系统	175
9.5.2	风水互补发电系统的设计	154	11.2.1	太阳能户用系统	175
9.6	柴油发电机基础	154	11.2.2	商品化风能户用系统	176
9.6.1	柴油发电机	154	11.2.3	商品化风光互补户用系统	177
9.6.2	汽油发电机	156		习题	178
9.6.3	柴油发电机组或汽油发电机组的选型	156	第12章	风能太阳能社区供电系统设计	179
9.7	其他互补和后备电源	157	12.1	负荷分析和负荷增长估算	179
9.8	互补系统的经济性	157	12.1.1	负荷类型	179
9.9	科学合理地选择和设计可再生能源供电技术	158	12.1.2	负荷与用电量计算	179
	习题	158	12.1.3	负荷增长评估	180
第10章	交流配电和局域电网	159	12.2	选择适合的可再生能源发电技术	181
10.1	可再生能源离网独立供电系统的构成和局域(村落)电网	159	12.3	发电系统的设计	182
10.2	村落电网基本要求	160	12.3.1	风力独立发电系统设计	182
10.2.1	站内线路	160	12.3.2	太阳能光伏发电系统设计	184
10.2.2	输配电线路	160	12.3.3	再生能源互补发电系统	185
10.3	交流配电	160	12.3.4	燃油后备供电设备的容量设计(使用柴油、汽油或其他)	
10.3.1	可再生能源交流配电装置基本原理结构	161			

燃料)	186	14.1 风能太阳能供电系统的运行	217
12.4 系统综合设计	187	14.1.1 集中供电系统	217
12.4.1 蓄电池容量确定	187	14.1.2 户用系统	220
12.4.2 控制器	187	14.2 风能太阳能发电系统的维护保养	220
12.4.3 DC/AC 逆变器	187	14.2.1 风力发电机组的日常维护	220
12.4.4 监测设备	188	14.2.2 太阳能阵列的日常维护	221
12.5 系统设计实例	188	14.2.3 蓄电池的日常维护	221
12.5.1 风力发电系统设计实例	188	14.2.4 控制器、逆变器等电子设备的	
12.5.2 太阳能发电系统设计实例	191	日常维护	223
12.5.3 互补系统设计实例	194	14.2.5 柴油发电机的日常维护	224
习题	196	14.2.6 输电线路的日常维护	225
第 13 章 风能太阳能发电系统的安装和		14.2.7 低压配电盘维护管理	225
试运行	197	习题	226
13.1 风力发电系统的安装和试运行	197	第 15 章 风能太阳能发电系统的故障	
13.1.1 收货和搬运	197	诊断及处理	227
13.1.2 安装塔架时的安全性	198	15.1 风力发电机组的故障诊断及处理	227
13.1.3 上倾拉索塔的安装	199	15.2 太阳能阵列的故障诊断及处理	229
13.1.4 拉索张力调整	203	15.2.1 电池板组件的维护	229
13.1.5 风力发电机的装配和系统		15.2.2 太阳能电池板支架	230
吊装	204	15.3 蓄电池的故障诊断及处理	230
13.1.6 接线盒和控制器的连接	206	15.4 控制器、逆变器等电子设备的故障	
13.1.7 试运行	206	诊断及处理	233
13.1.8 风力发电系统的验收	207	15.4.1 充电控制器的常见故障	233
13.2 安装太阳能系统	208	15.4.2 逆变器的常见故障	233
13.2.1 安装准备	208	15.5 柴油发电机的故障诊断及处理	233
13.2.2 工具和材料	208	15.6 局域电网的常见故障、原因和处理	
13.2.3 安装太阳能电池方阵	208	方法	235
13.2.4 安装控制器和逆变器	210	15.7 低压配电盘故障诊断及处理	236
13.2.5 安装交流配电柜(箱)	211	习题	237
13.2.6 光伏系统布线	211	第 16 章 风能太阳能发电系统及电站	
13.2.7 光伏发电系统安装调试大纲	212	安全	238
13.3 风光互补系统的安装	214	16.1 安全概述	238
13.4 蓄电池组的安装	214	16.2 基本安全信息	238
13.4.1 安全第一	214	16.2.1 系统电流和电压	238
13.4.2 安装蓄电池要领	214	16.2.2 布线和断开要求	238
13.4.3 安装蓄电池组	214	16.2.3 接地	239
13.5 安装柴油发电机	215	16.2.4 可再生能源供电系统输出	239
13.5.1 安装柴油发电机组	215	16.3 现场安全须知	239
13.5.2 安装/调试备用充电机	216	16.3.1 现场不安全因素	239
习题	216	16.3.2 现场工作安全要求	240
第 14 章 风能太阳能发电系统的运行和		习题	242
维护保养	217	参考文献	243



第 1 章 可再生能源基础

1.1 可再生能源

1.1.1 可再生能源概述

人们习惯上把能源分为一次能源和二次能源。

一次能源是指可以从自然界直接获取的能源。其中煤炭、石油和天然气是千百万年前埋在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的，又称为化石能源，它们是当今世界中一次能源的三大支柱，构成了全球能源家族结构的基本框架。一次能源中还包括水能、太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能以及核能等。

二次能源是指无法从自然界直接获取，必须经过一次能源的消耗才能得到的能源。电能是最主要的二次能源。电能是从其他形式的一次能源转化而来的。

一次能源又可以分为可再生能源和非可再生能源两大类。非可再生能源是指经过千百万年形成的、短期内无法恢复的能源，如煤炭、石油、天然气等。随着大规模开发利用，非可再生能源的储量愈来愈少，总有枯竭之时。

可再生能源泛指多种取之不竭的能源，严谨地说，是人类有生之年都不会耗尽的能源。它对环境无害或危害极小，而且资源分布广泛，适宜就地开发利用。可再生能源不包含现时有限的能源，如化石燃料和核能。可再生能源主要包括太阳能、风能、水能、生物质能、地热能和海洋能等。大部分的可再生能源其实都是太阳能的储存。可再生的意思并非提供十年的能源，而是百年甚至千年的。它们在自然界可以循环再生。

可再生能源资源作为一种独立存在的能量载体，在总体上具有许多不同于煤炭、石油、天然气等化石能源资源的特点：其一具有可再生性；其二能量密度低；其三具有间断性；其四分布分散，呈现明显的地带性；其五可再生能源资源和生态环境密切相关。研究表明，这些资源不仅和物质生产过程（如农业生产过程）的能量循环有关，而且和物质流的循环过程密切相关。一旦资源的开发利用陷入不合理的状态，则可直接造成生态系统的失衡和破坏，如对林木资源的乱砍滥伐，将带来严重的水土流失和土壤植被的破坏；同时有些可再生能源资源还是支持水土系统平衡的基本物质之一，如作物秸秆、人畜粪便中营养成分即是构成水土平衡的一些基本元素。

随着能源危机的出现，人们已越来越重视可再生能源的开发、研究和利用。

1.1.2 常用的可再生能源

常用的可再生能源有风能、太阳能、微小水电、生物质能、地热能和海洋能等。

① 风能。风能是指风所承载的能量，风能的大小决定于风速和空气的密度。我国北方地区和东南沿海地区一些岛屿，风能资源丰富。据国家气象部门有关资料显示，我国陆地可开发利用的风能资源为 $2.53 \times 10^8 \text{ kW}$ ，主要分布在东南沿海及岛屿、新疆、甘肃、内蒙古和东北地区。此外，我国海上风能资源也很丰富，初步估计是陆地风能资源的 3 倍左右，可

开发利用的资源总量为 $7.5 \times 10^8 \text{ kW}$ 。

② 太阳能。太阳能是指太阳日照所带来的能量，它的计量一般以阳光照射到地面的辐射总量，包括太阳的直接辐射和天空散射辐射的总和。太阳能的利用方式主要有：光伏发电（太阳能电池）系统，将太阳能直接转换为电能；太阳能聚热系统，利用太阳的热能产生电能；被动式太阳房；太阳能热水系统；太阳能取暖和制冷等。

③ 水能。水的流动可产生能量，通过捕获水流动的能量发电，称为水电。小水电在我国是指总装机容量小于或等于 $5 \times 10^4 \text{ kW}$ 的水电站。

④ 生物质能。生物质能包括自然界可用作能源用途的各种植物、人畜排泄物以及城乡有机废物所转化成的能源，如薪柴、沼气、生物柴油、燃料乙醇、林业加工废弃物、农作物秸秆、城市有机垃圾、工农业有机废水和其他野生植物等。

⑤ 地热能。地热能是指贮存在地下岩石和流体中的热能，它可以用来发电，也可以为建筑物供热和制冷。根据测算，全球潜在的地热资源总量约相当于每年 $493 \times 10^8 \text{ t}$ 标准煤。

⑥ 海洋能。海洋能是潮汐能、波浪能、温差能、盐差能和海流能的统称，海洋通过各种物理过程接收、储存和散发能量，这些能量以潮汐、波浪、温度差、海流等形式存在于海洋之中。例如，潮汐的形成源于月亮和太阳对地球的吸引力，涨潮和落潮之间所负载的能量称之为潮汐能；潮汐和风又形成了海洋波浪，从而产生波浪能；太阳照射在海洋的表面，使海洋的上部和底部形成温差，从而形成温差能。所有这些形式的海洋能都可以用来发电。

1.2 可再生能源发电技术及其基本分类

可再生能源一般指的都是指一次能源，如风能、太阳能、微小水电、生物质能、地热能和海洋能等。这些能源，有一部分是可以通过非电能转换的形式加以利用的，如风力机械提水机、太阳能热水器、水力农具等。除了这部分通过非电能的形式加以利用外，大部分人类使用的设备都是采用电能作为基本动力的。而电能是二次能源。二次能源一般需由一次能源转换而来。所以可再生能源都要通过一定的技术手段把非电能转换成电能，才能加以利用。这种技术就是可再生能源发电技术，如风力发电技术、太阳能光伏技术和水力发电技术等。严格讲，可再生能源发电技术其实是一种能源转换技术。

由于发电的基本目的、采用的发电技术和电力传输的方式等的不同，一般把可再生能源发电分成以下四类。

① 可再生能源并网发电 可再生能源并网发电就是指可再生能源发电时并入供电电网运行的发电方式。这种可再生能源发电的发电场都必须建设在现有大电网的周边，或者为了并网的目的建设/延伸现有电网到可再生能源发电场。可再生能源转换设备把可再生能源的能量（非电能）转换成满足一定技术标准的电能（电压频率和相位），并通过一定的电子控制装置把电能输入到大电网中去。

可再生能源并网发电的主要目的是：使用绿色的能源；减少温室气体的排放；改善对非可再生能源（矿物燃料）的依赖；改善高峰时的电力供应情况。

在我国沿海、内蒙古和新疆等省自治区建设的大规模风力发电场就属于可再生能源并网发电。图 1.1 为广东南澳岛上的大型风力发电场^①。

① 本教材中所引用的图片，凡未加说明者，均由编者提供。

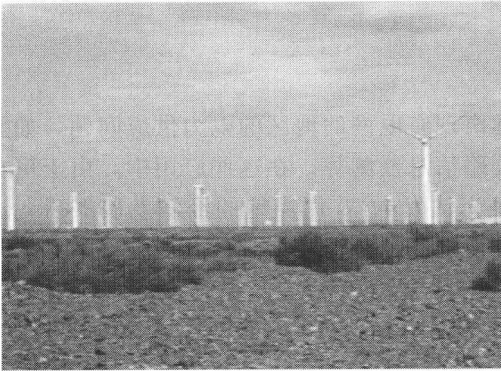


图 1.1 广东南澳岛上的大型风力发电场

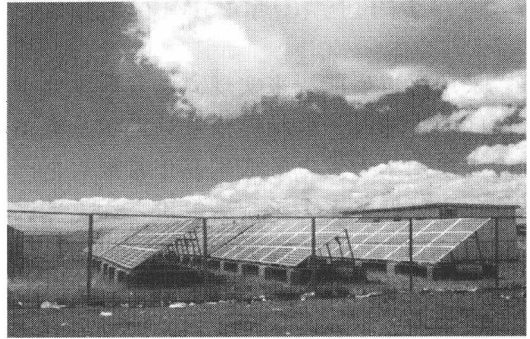


图 1.2 送电到乡项目建设的西藏纳木错乡光伏电站

② 可再生能源离网社区（村落）集中供电 可再生能源离网社区（村落）集中供电，又称独立供电，是指可再生能源发电摆脱对现有电网的依赖而进行独立发电的发电方式。这种发电系统一般都建设在传统电网到达不了的地方，自己形成一个独立电网，对一个社区（村落）提供电力供应。通常情况下，这种可再生能源离网社区（村落）集中供电系统也能提供标准的三相交流电，使用户能使用标准的电气设备、电动工具和机械设备等。中国国家发改委在 2002 年启动的“送电到乡”项目，就是典型的利用可再生能源离网社区（村落）集中供电技术来解决 989 个行政村（乡政府所在地）的用电问题。据不完全统计，我国可再生能源离网独立供电的村落系统约有 1200 个以上。图 1.2 为送电到乡项目建设的西藏纳木错乡光伏电站。



图 1.3 牧区风光互补系统



图 1.4 风能住户分布式发电

③ 可再生能源户用发电 可再生能源户用发电与可再生能源离网社区（村落）集中供电类似，也是一种脱离对现有电网依赖而进行独立发电的发电方式。它与可再生能源离网社区（村落）集中供电的最大区别在于它没有独立电网，没有电站管理机构，属一家一户和一个单位内部的自主发电系统。图 1.3 为牧区风光互补系统。

④ 可再生能源分布式发电 可再生能源分布式发电，是指在非常靠近终端负载的地方、在低压电网中接入小型发电设备。这是当前清洁能源和环保措施中发展最快的领域之一，它也同时为电力用户降低电费支出提供了可能性。这种技术在北美和欧洲非常成熟。以前人员用柴油发电机作为分布式发电设备，当前由于风力发电机的成本远比太阳能低，人们普遍采用的分布式发电设备主要是小型风力发电机。图 1.4 为风能住户分布式发电。

1.3 可再生能源离网发电

采用可再生能源来实现离网发电主要是解决远离现有电网的地区的电力供应问题，如无电地区电力建设、移动通信基站电源、铁路高速公路信息监测等。在这些应用中，由于可再生能源离网集中发电的成本高于常规火电（尤其是光伏发电），而当地的经济发展滞后，居民的收入很低，无力承担高电价，无电地区电力建设的问题最为复杂。

1.3.1 可再生能源离网发电的主要应用

1.3.1.1 无电地区电力建设

一个社会要从解决基本生存问题提升到强盛而繁荣阶段，必须要具备提供一些基本服务的能力，并且这些服务应该是可以承担得起的。这些基本服务包括饮水、医疗、教育、运输和通信等。而电力资源的有效使用不仅是实现这些服务的前提，更是建设和谐社会，促进社会加速进步的重要因素。

电力的有效使用，通过提供完善的健康服务、良好的教育条件以及减少妇女用于非生产性家务的时间和精力，可以改善人们的生活水平与生活质量。电力同时也是增加经济生产、创造新的创收机会的工具。电力使偏远农村地区的人们能够使用现代化的通信系统与外部世界沟通，摆脱与世隔绝的状况。电力资源无形中成为这些农村社区与当地的市场以及国内其他地区市场的联系纽带，而这一纽带对脱贫致富起到了至关重要的作用，并且促进了国家政治与社会的凝聚力。电力是经济和社会发展的重要基础，也是现代文明和小康生活的重要标志。

但是，虽然近年来我国电力发展很快，电网覆盖率已经达到了 99%，基本满足了经济

和社会发展的需要，但我国幅员辽阔，经济社会发展不平衡，由于受历史和自然条件的制约，在我国偏远山区、牧区和岛屿等地，截至 2006 年年初仍有约 1147 万人没有解决用电问题，严重制约着这些地区的经济社会发展和人民生活水平的提高。因此，解决无电地区用电问题已经成为促进地区经济协调发展、改善当地生产生活条件、脱贫致富、实现全面建设小康社会目标的重要内容。然而，缺乏电力供应是制约偏远农村经济发展的主要原因之一，因此为偏远地区的人们送去光明成为当务之急。图 1.5 的卫星照片显示

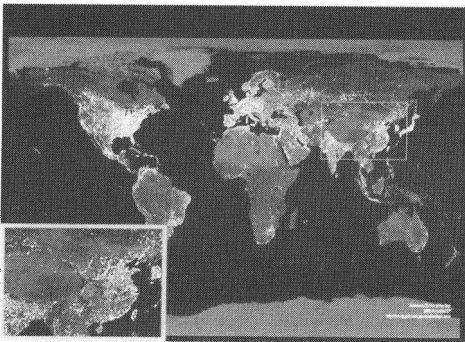


图 1.5 世界和中国的夜晚
(来源：美国 NASA)

了中国无电地区的大致分布。

在 2001 年初，中国无电人口统计约 3000 万人。近年来，我国政府实施了农网改造，另外还实施了许多偏远农村可再生能源电气化项目，如光明工程先导项目、送电到乡项目，中日合作光伏发电示范项目、UNDP/GEF 的加速中国可再生能源商业化能源建设项目（CPR/97/G31）、世界银行可再生能源商业化推广项目（REDP）、中德财政援助光伏合作项目、“送电到乡”项目等。到 2006 年初，中国无电人口统计约 1147 万人，见表 1.1。无电人口仍然主要分布在西部各省区，但数量已经比 2001 年有了明显的减少，全国现在无电人口的统计数字仅为 2001 年的 38%。图 1.6 所示为 UNDP/GEF 的加速中国可再生能源商业化能源建设项目在新疆建设的示范风光互补电站。

表 1.1 中国无电人口 (2006 统计数据)①

序号	省份	无 电		序号	省份	无 电	
		户数	人口			户数	人口
1	云南	503003	2189361	18	山西	12744	50976
2	四川	476707	1939150	19	宁夏	12664	49650
3	西藏	212431	1200668	20	辽宁	10854	33403
4	内蒙古	186658	746632	21	大连	9821	44670
5	广西	163302	727892	22	福建	4797	20901
6	重庆	153699	552297	23	河北	2800	11909
7	甘肃	123936	523394	24	湖南	31074	124595
8	河南	134472	505372	25	海南	8700	35000
9	青海	89488	495372	26	江苏	0	0
10	陕西	126838	477831	27	安徽	0	0
11	贵州	111830	466350	28	北京	0	0
12	新疆	95300	415700	29	上海	0	0
13	湖北	72947	243482	30	天津	0	0
14	广东	47938	238417	31	吉林	0	0
15	江西	45854	191434	32	浙江	0	0
16	黑龙江	34590	104876	33	山东	0	0
17	新疆兵团	23234	78106		合计	2695681	11467438

1.3.1.2 移动通信

在通信日益发达的今天，随着通信覆盖面的扩展，很多通信站远离常规电网，新建通信站往往要延伸电网，电网延伸代价很高，甚至是不可实现的。

通信站要求有非常稳定可靠的电力供应。通信站的容量越来越大。国际油价节节攀升、运输困难，还经常受到气候等条件制约。在负荷小的情况下，柴油发电效率非常低，同时，柴油机需要很好的保养。

全球移动 (GSMA) 发展基金 2008 年 9 月在肯尼亚首都召开。大会发出“绿色能源倡议”，与“移动通信绿色能源项目”相结合，在今后的移动通信基站建设中推广绿色能源。倡议认为，未来移动通信用户的增加主要依赖于无电地区的人口 (在今后的五年内，估计每年要新增 5 万~10 万个离网基站)。目前柴油发电处于离网发电的主导位置，但是运行的代价很大，需要稳定的柴

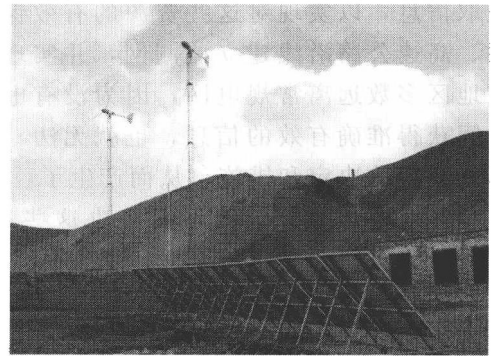


图 1.6 UNDP/GEF 的加速中国可再生能源商业化能源建设项目在新疆建设的示范风光互补电站

① 许洪华，中国科学院电工研究所，中国可再生能源农村电气化，ISES Solar World Congress 2007 (SWC2007) Sept. 2007。

油调配和设备维护，而且对环境有很大的负面影响。常规电网的供应往往是不可靠的，或者电网延伸是非常昂贵的。大会倡议运营商对基站现场规划采用太阳能阵列、风力发电机等。2008年11月在澳门的亚洲移动通信大会和展览会上还专辟了一个绿色能源专题。

中国移动和联通等早在21世纪初就开始尝试在移动基站中采用风能、太阳能和风光互补电源。中国移动还在2007年提出了“绿色能源计划”。图1.7所示为建于2004年的浙江台州海岛上的风光互补电站。

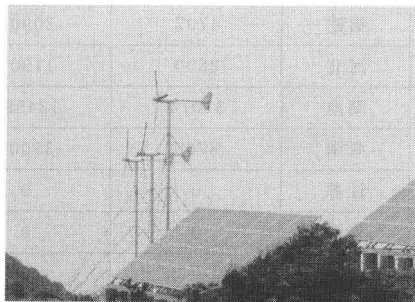


图 1.7 建于 2004 年的浙江台州海岛上的风光互补电站



图 1.8 风力发电系统为山西德大高速公路的信息系统供电

1.3.1.3 铁路公路道班、森林防护、海上交通管理和监测

大自然赋予了人类很多的自然资源，如海洋、森林。随着人们环保意识的提高，人们也在通过各种途径保护这些自然资源，比如国家林业局的“退耕还林”、国家海洋局的“可持续发展战略”等。随着社会的发展，信息时代的到来，人们需要更多更快地获取信息，以实现对这些资源的有效保护和利用。最基本的方法是在森林、海洋、铁路、高速公路沿线建立监测网，并实现实时的信息传递。然而，诸如海洋、森林等所在地区多数远离常规电网，因为没有电力供应，无法使用监控设备，人们无法在第一时间获得准确有效的信息，也就无法对森林火险、海啸、交通事故等作出正确的判断以及相应的决定和措施，从而产生了巨大的损失，甚至付出了宝贵的生命。

当常规电网的延伸不能解决这些地区的供电问题时，人们就需要寻求新的供电途径。

另一方面，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，解决这些地区电力供应问题的技术已经成熟，成为解决这些地区电力供应的主要途径。图1.8所示为风力发电系统为山西德大高速公路的信息系统供电。

可再生能源独立供电系统还可以在其他各种领域中发挥作用，如为学校、卫生所、农业灌溉、旅游、农机具维修、饭馆等提高电力。

1.3.2 可再生能源并网发电和离网发电的主要区别

可再生能源并网发电和离网发电的主要区别是前者必须和现有的大电网结合才能有效地工作，它的基本目的是向大电网输送电力，提供清洁能源，减少矿物燃料的使用，从而缓解人类对矿物燃料的依赖；后者则完全独立于现有电网，为没有常规电网供电的用户提供电力服务，它的基本目的是向常规电网不能到达、而又必须使用电力的用户提供电力服务。可再生能源离网发电也有环保作用，但环保作用往往是第二位的，