

分布式光伏并网指南

国网山西省电力公司 组编



浙江人民出版社
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE



国家能源局主管

中国电力传媒集团
CHINA ELECTRIC POWER MEDIA GROUP

分布式光伏并网指南

国网山西省电力公司 组编

 **浙江人民出版社**
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE

国家能源局主管
 **中国电力传媒集团**
CHINA ELECTRIC POWER MEDIA GROUP

图书在版编目(CIP)数据

分布式光伏并网指南 / 国网山西省电力公司组
编. —杭州: 浙江人民出版社, 2016.9

ISBN 978-7-213-07483-7

I. ①分… II. ①国… III. ①太阳能发电—
指南 IV. ①TM615-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 150013 号

分布式光伏并网指南

国网山西省电力公司 组编

出版发行: 浙江人民出版社 中国电力传媒集团

经 销:  中电联合(北京)图书有限公司
销售部电话: (010) 52238170 52238190

印 刷: 廊坊飞腾印刷包装有限公司

责任编辑: 殷俊莹 宗 合

责任印制: 郭福宾

网 址: <http://www.cpn.cn/tsyxzx/>

版 次: 2016 年 9 月第 1 版 · 2016 年 9 月第 1 次印刷

规 格: 787mm×1092mm 16 开本 · 9.5 印张 · 190 千字

书 号: ISBN 978-7-213-07483-7

定 价: 27.00 元

敬告读者

如有印装质量问题, 销售部门负责退换

版权所有 翻版必究

编 委 会

主 任 王生明

副主任 申庆斌 王尚斌 魏凤霞 靳 龙 牛晋永
王金浩

编 委 陈扬波 吴浩林 朱志瑾 王龙珠 李 娟
张 宇

编 写 组

主 编 高 峰

副主编 陈扬波 王普辉

成 员 倪琳莎 王 洪 钟泽宇 李晓霞 赵 磊
李文转 申红岗 全振嘉 徐 龙 蒋红音
石振东 成慧娟 张 宇 张 丽 杜雅飞
高 翔 靳王岗 卢建生 潘美容 郝俊博
杨 森 李 彬



前 言

近年来,分布式光伏并网发电迅猛发展,尤其是自然人屋顶光伏项目,具有点多面广、便于在负荷侧大量开发的特点,同时由于国家推行较高的发电补贴政策,使依靠光伏并网发电获得收益成为精准扶贫、居民投资增收的得力手段,因而得到了广大客户的积极响应。在与大量分布式光伏项目业主的接触过程中,我们意识到这类客户迫切希望全方位了解分布式光伏发电并网政策、安装技术、收益回报等诸多信息。为此,国网山西省电力公司客户服务中心(以下简称“省客服中心”)成立《分布式光伏并网指南》编写组,在山西省电力公司营销部(以下简称“省营销部”)的大力支持下,整合了公司内外的诸多资源,历时半年,编成本书。

本书一共十章,第一章绪论部分主要介绍分布式光伏发展现状,由省客服中心张丽、卢建生撰写;第二章光伏发电基本原理由省客服中心石振东、靳王岗撰写;第三章分布式光伏并网政策解析由省营销部陈扬波撰写;第四章分布式光伏并网流程由省客服中心李文转、杜雅飞撰写;第五章分布式光伏并网接入系统设计由省客服中心高峰、太原供电公司经研院钟泽宇、李晓霞、蒋红音撰写;第六章小型分布式光伏发电项目现场施工由山西德天恒盛科技有限公司王洪撰写;第七章分布式光伏并网电能质量问题由山西省电力科学院王金浩、徐龙撰写;第八章低压分布式光伏并网项目验收要点由省客服中心高峰撰写;第九章分布式光伏运行数据监测与收益回报分析由吕梁供电公司倪琳莎、高翔撰写;全书由省客服中心高峰审核、校对定稿。

在本书编撰过程中,无锡英臻科技有限公司、北京国投创电科技有限公司提供了部分网络监测页面图片,在此一并致谢。

《分布式光伏并网指南》编委会

2016年3月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 发展分布式光伏并网发电的背景及意义	1
第二节 国际光伏发电现状	2
第三节 国内光伏发电现状	3
第二章 光伏发电基本原理	6
第一节 光电转换原理	6
第二节 光伏材料	6
第三节 光伏发电系统	8
第三章 分布式光伏并网政策解析	18
第一节 政府层面分布式光伏政策	18
第二节 电网层面分布式光伏并网业务文件及规范	30
第三节 分布式光伏客户全业务办理关键环节	34
第四章 分布式光伏并网流程	36
第一节 电网接入业务流程	36
第二节 并网模式选择	46
第三节 运营及电费、补贴结算	46
第五章 分布式光伏并网接入系统设计	50
第一节 分布式光伏并网总体技术要求	50
第二节 分布式光伏并网几种典型接入方式	51
第三节 400 千瓦以下小容量分布式光伏发电项目典型设计	53
第四节 分布式光伏专线接入 10 千伏电网方案	68
第五节 分布式光伏项目 T 型接入 10 千伏电网方案	77
第六章 小型分布式光伏发电项目现场施工	86
第一节 组件方阵	86
第二节 安装施工准备	90
第三节 安装施工	91

第四节 实例施工图	98
第七章 分布式光伏并网电能质量问题	104
第一节 谐波	104
第二节 电压波动和闪变	105
第三节 电压暂降与短时中断	106
第四节 三相不平衡度	107
第五节 分布式光伏电源接入对电能质量要求	108
第八章 低压分布式光伏并网项目验收要点	110
第一节 低压分布式光伏并网验收	110
第二节 380/220 伏低压分布式光伏并网防倒送电措施	114
第九章 分布式光伏运行数据监测与收益回报分析	119
第一节 分布式光伏运行数据监测	119
第二节 分布式光伏收益回报分析	126
第三节 分布式光伏发电发展方向与前景	130
第十章 分布式光伏并网常见问题	132
参考文献	143

我国能源结构的特点是以煤炭为主，多年来重点依靠煤炭，火电占国内电力装机总量的 70%以上。在电网的可消纳范围内，增加新能源发电比例，减少燃煤发电比例，有利于环保及可持续发展，具有深远的现实意义。

第二节 国际光伏发电现状

一、国际光伏发展现状

目前，全球能源形势已相当紧迫，能源问题已成为世界十大焦点问题（能源、水、食物、环境、贫穷、恐怖主义和战争、疾病、教育、民主、人口）之首。2015 年全球人口 72 亿，能源需求折合成装机是 17 太瓦；据联合国人口基金会预测，世界人口将在 2050 年达到 93 亿，按照每人每年 GDP 增长 1.6%，GDP 单位能耗按照每年减少 1%，则能源需求装机将是 30~60 太瓦。

世界上水能可开采资源只有 0.9 太瓦；风能实际可开发资源 2 太瓦；生物质能 3 太瓦；而太阳能实际可开采资源高达 600 太瓦。由于光伏发电能为人类提供可持续能源，并保护我们赖以生存的环境，世界各国都在竞相发展太阳能光伏发电，尤其以德国、日本和美国发展最快。

过去的 10 年中，全球光伏发电市场连续 8 年年增长率超过 35%。在技术进步和各国政府的激励政策驱动下，2000~2008 年，全球光伏发电年均负荷增长率为 47%，2008 年年产量达到 6.4 吉瓦；2009 年年产量达 10.5 吉瓦；至 2014 年，全球太阳能年装机容量稳步增长，达到 44 吉瓦；2015 年为 53~57 吉瓦。

近 30 年来，光伏发电组件成本显著降低。根据 Solarbuzz LLC. 年度 PV 工业报告，2006 年全球光伏发电累计装机容量已经超过 8.5 吉瓦；2007 年底约 12 吉瓦，发电成本 50 美分/度；2010 年达到 76 吉瓦，发电成本达到 20 美分/千瓦时以下；2020 年将达到 300 吉瓦，发电成本降至 15 美分/千瓦时以下；到 2050 年光伏发电将在全球电力供应中占总能耗的 10%~20%，到 21 世纪末太阳能发电将在能源结构中起到主导作用，成为人类的基础能源之一。随着技术的进步，或许未来的实际进程将大大超出这一规划。

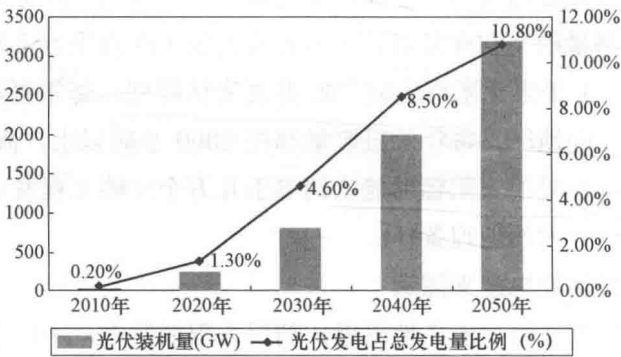


图 1-2-1 国际能源署（IEA）太阳能光伏发展趋势

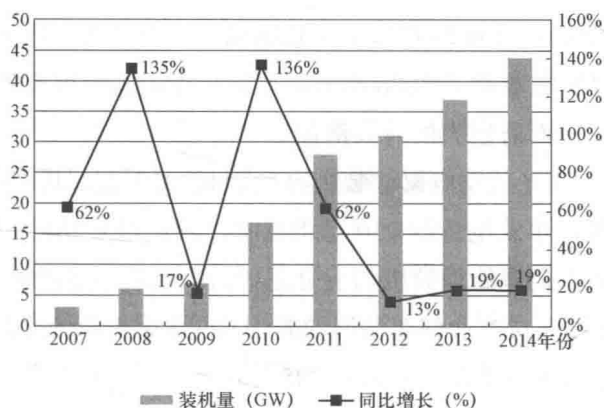


图 1-2-2 2007~2014 年全球光伏新增装机量情况

二、国际光伏产业的技术发展

由于生产技术不断进步，光伏组件的价格近年来一直“跌跌不休”。几十年来围绕着降低成本的各种研究开发工作取得了显著成就，表现在电池效率不断提高、硅片厚度持续降低、产业化技术不断改进等方面，对降低光伏发电成本起到了决定性的作用。

1. 商业化电池效率不断提高。先进技术不断向产业注入，使商业化电池技术不断得到提升。目前商业化晶硅电池的效率达到 15%~20%（单晶硅电池 16%~20%，多晶硅电池 15%~18%）；商业化单结非晶硅电池效率 5%~7%，双结非晶硅电池效率 6%~8%，非晶硅/微晶硅的叠层电池效率 8%~10%，而且稳定性不断提高。电池效率的提高是光伏发电成本下降的重要因素之一。

2. 商业化电池硅片厚度持续降低。降低硅片厚度是减少硅材料消耗、降低晶硅太阳能电池成本的有效技术措施，是光伏技术进步的重要方面。30 多年来，太阳电池硅片厚度从 20 世纪 70 年代的 450~500 微米降低到目前的 140~180 微米，降低了三分之二以上。硅材料用量的大幅度降低是技术进步促进成本降低的重要范例之一，硅用量降到 7 吨/兆瓦以内。

3. 产业化规模不断扩大。生产规模不断扩大和自动化程度持续提高是使太阳电池生产成本降低的重要原因。太阳电池单厂生产规模从 20 世纪 80 年代的 1~5 兆瓦/年发展到 90 年代的 5~30 兆瓦/年，2006 年 25~500 兆瓦/年，2007 年 25~1000 兆瓦/年。生产规模与成本降低的关系体现在学习曲线率 LR (Learning Curve Rate, 即生产规模扩大 1 倍时，生产成本降低的百分比) 上。由太阳电池 30 年统计的结果可知，其 LR 为 20% (含技术进步在内)，是所有可再生能源发电技术中 LR 值最大的。太阳电池产业是现代集约型经济的最佳体现者之一。

第三节 国内光伏发电现状

一、国内光伏发展现状

中国太阳能资源非常丰富，理论储量达每年 17000 亿吨标准煤。在中国广阔的土地上，

大多数地区年平均日辐射量在每平方米 4 千瓦时以上，青藏高原地区日辐射量最高，达每平方米 7 千瓦时；年日照时数大于 2000 小时。与同纬度的其他国家相比，与美国相近，比欧洲、日本优越得多，因而有巨大的开发潜能。

截至 2014 年底，国内光伏发电累计装机容量 2805 万千瓦。其中：光伏电站 2338 万千瓦、分布式 467 万千瓦，年发电量约 250 亿千瓦时，同比增长超过 200%。2014 年新增装机容量 1060 万千瓦，约占全球新增装机的五分之一，占我国光伏电池组件产量的三分之一，实现了《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》中提出的平均年增 1000 万千瓦的目标，其中：光伏电站 855 万千瓦、分布式 205 万千瓦。具体统计信息见表 1-3-1：

表 1-3-1 国家能源局 2014 年中国光伏发电报告精选数据

年份(年)	2004	2005	2006	2007	2008	2009
当年新增(万千瓦)	1	0.8	1	2	4	14.4
年底累计(万千瓦)	6.2	7	8	10	14	28.4
年增长率(%)	19.29	12.9	14.3	25	40	102.8
年份(年)	2010	2011	2012	2013	2014	
当年新增(万千瓦)	57.9	207	356.6	1094.8	1060.3	
年底累计(万千瓦)	86.4	293.4	650	1744.8	2805.1	
年增长率(%)	203.8	239.7	121.6	168.4	60.8	

数据来源：国家能源局《2014 年度中国太阳能发电建设统计评价报告》第 8 页。

二、国内光伏发电建设情况

目前国家对于环保越来越重视，光伏发电在缓解雾霾、减少污染方面作用明显，未来应该也会保持较快的发展。按照国家发改委编制的《可再生能源中长期发展规划》和国家能源局的《太阳能发电发展“十二五规划”》，我国的太阳能光伏发电建设重点如下：

1. 偏远地区无电村和无电户的供电问题。

采用户用光伏发电系统或建设小型光伏电站解决，重点地区是西藏、青海、内蒙古、新疆、宁夏、甘肃、云南等省（区、市）。

2. 在经济较发达、现代化水平较高的大中城市，建设与建筑物一体化的屋顶太阳能并网光伏发电设施。

首先在公益性建筑物上应用，然后逐渐推广到其他建筑物，同时在道路、公园、车站等公共设施照明中推广使用光伏电源。

3. 建设较大规模的太阳能光伏电站和太阳能光热发电电站。

“十二五”时期，重点在青海、甘肃、新疆、内蒙古等太阳能资源和未利用土地资源丰富地区，建成并网光伏电站总装机容量 1000 万千瓦。按光伏电站每千瓦投资 1 万元、分布式光伏系统每千瓦投资 0.8 万元测算，总投资需求约 2500 亿元。

4. 在河北北部、山西北部、四川高原地区、辽宁西北部、吉林西部、黑龙江西部和山东部分地区，稳步推进太阳能电站建设。在确保资源条件与建设条件可行的基础上，统筹安排部分太阳能光伏电站项目。鼓励在河北中南部、山西中南部、山东、四川与东北各主要城市工业园区、大型工业企业建设分布式太阳能发电系统。

中国坚持“自用为主、富余上网、因地制宜、有序推进”的原则，积极发展分布式能源。以城市、工业园区等能源消费中心为重点，大力推进分布式可再生能源技术应用。因地制宜在农村、林区、海岛推进分布式可再生能源建设。制定分布式能源标准，完善分布式能源上网电价形成机制和政策，努力实现分布式发电直供及无歧视、无障碍接入电网。（《中国的能源政策（2012）》白皮书）

第二章 光伏发电基本原理

第一节 光电转换原理

光伏效应在 19 世纪即被发现。1839 年,法国的贝克莱尔发现半导体和电解质接触形成的结,在光照下会产生一个电压,这就是后来人们熟知的光生伏特效应,即光伏效应。光伏效应指光照使不均匀半导体或半导体与金属结合的不同部位之间产生电位差的现象。它首先是由光子(光波)转化为电子、光能量转化为电能的过程;其次,是形成电压的过程。有了电压,就像筑高了大坝,如果两者之间连通,就会形成电流的回路。

第二节 光伏材料

光伏材料是将太阳能直接转换成电能的材料。光伏材料又称太阳能电池材料,只有半导体材料具有这种功能。可做太阳能电池材料的材料有单晶硅、多晶硅、非晶硅、GaAs、GaAlAs、InP、CdS、CdTe 等。用于空间的有单晶硅、GaAs、InP,用于地面已批量生产的有单晶硅、多晶硅、非晶硅,其他尚处于开发阶段。

半导体(semiconductor),指常温下导电性能介于导体(conductor)与绝缘体(insulator)之间的材料。无论从科技或是经济发展的角度来看,半导体的重要性都是非常巨大的。今日大部分的电子产品,如计算机、移动电话或是数字录音机当中的核心单元都和半导体有着极为密切的关联。常见的半导体材料有硅、锗、砷化镓等,而硅更是各种半导体材料中在商业应用上最具有影响力的。

一、单晶硅光伏电池

单晶硅光伏电池,是以高纯的单晶硅棒为原料制造的太阳能电池,是当前开发最快的太阳能电池之一。它的构造和生产工艺已定型,产品广泛应用于空间和地面。

二、多晶硅光伏电池

多晶硅薄膜太阳电池是将多晶硅薄膜生长在低成本的衬底材料上,用相对薄的晶体硅层作为太阳电池的激活层,不仅保持了晶体硅太阳电池的高性能和稳定性,而且材料的用量大幅度下降,明显地降低了电池成本。

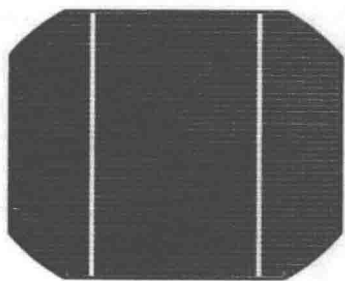


图 2-2-1 多晶硅薄膜太阳能电池 (1)

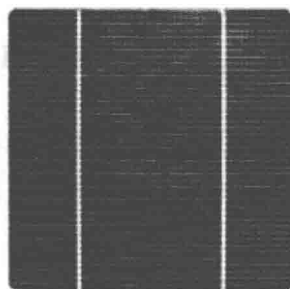


图 2-2-2 多晶硅薄膜太阳能电池 (2)

三、非晶硅光伏电池

非晶硅光伏电池是 1976 年出现的新型薄膜太阳能电池,它与单晶硅和多晶硅太阳能电池的制作方法完全不同,硅材料消耗很少,电耗更低,非常吸引人。



图 2-2-3 非晶硅光伏电池

表 2-2-1

各种光伏电池性能

电池类别	实验室效率	批量产品效率	优点	缺点	商业化进度	我国的发展
单晶硅	24.7%	16%~19%	工艺成熟,技术完善	硅耗大、成本较高	已商业量产	拥有完整产业链和国际领先企业
多晶硅	20.3%	15%~17%	工艺成熟,技术完善	硅耗大、成本一般	已商业量产	拥有完整产业链和国际领先企业
非晶硅	13%	8%~10%	工艺简单、硅耗小、成本低、弱光发电	投资大、有衰减	逐步商业量产	大批企业介入,但设备、原材料被国外垄断
铜铟镓硒 (CIS/CIGS)	19.9%	14%~15%	硅耗小、成本低、性能稳定、光谱响应范围大、衰减小	铟和硒稀有、规模受限	逐步商业量产	国内少量企业介入
碲化镉 (CdTe)	16.9%	10%~12%	高光吸收率、硅耗小、成本低	碲储量少、镉有毒	已商业量产	国外垄断、国内很少
砷化镓 (GaAs)	43.5%	35%~40%	耐高温、硅耗小、效率高、衰减小、占地少	生产技术较复杂、成本高、结构复杂、跟踪系统精度要求高	少量商业试点	国内零星企业

第三节 光伏发电系统

光伏发电系统主要由太阳能电池板(光伏组件 / 阵列)、汇流箱和逆变器三大部分组成。可将太阳能转化为电能，直接推动负载工作，或送往蓄电池中予以存储，还可以逆变后并入公用电网。

一、光伏组件/阵列

(一) 太阳能电池片

太阳能电池片是构成光伏组件 / 阵列的最小单元。以表 2-3-1 为例，列出了 SF-156 系列多晶硅太阳能电池的技术参数。可见同样外观尺寸的电池片，其分级档次很细，技术参数差别很大，因此采用不同档次的电池片，制造出的组件电气性能差别也是很大的。

表 2-3-1 SF-156M 多晶体硅太阳能电池技术参数

档次	转换效率	最大功率 P_m (瓦)	最大功率点电流 I_m (安)	最大功率点电压 V_m (毫伏)	短路电流 I_{sc} (安)	开路电压 V_{oc} (毫伏)
A	17.50%	4.258	8.189	520	$9.30 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
B	17.25%	4.198	8.072	520	$9.22 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
C	17.00%	4.137	7.955	520	$9.11 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
D	16.75%	4.076	7.914	515	$9.01 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
E	16.50%	4.015	7.796	515	$8.89 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
F	16.25%	3.954	7.678	515	$8.79 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
G	16.00%	3.893	7.560	515	$8.67 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
H	15.75%	3.833	7.515	510	$8.56 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
I	15.50%	3.772	7.396	510	$8.45 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$
J	15.25%	3.711	7.348	505	$8.30 \pm 5\%$	$625 \pm 5\%$

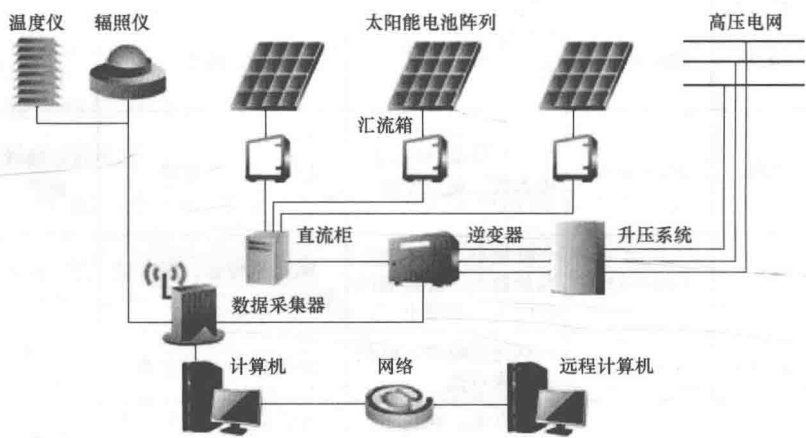


图 2-3-1 光伏发电示意图

(二) 组件

单体太阳能电池片不能直接做电源使用。做电源必须将若干单体电池串、并联连接和严密封装成组件。

表 2-3-2 为某系列多晶硅组件的电气性能参数及外形尺寸。列出了四种不同功率组件的电性能参数。

表 2-3-2 电 性 能 参 数

型号	JNMP72-300	JNMP72-305	JNMP72-310	JNMP72-315
STC 条件下最大功率(瓦)	300	305	310	315
最大功率电压 (V_{mp} /伏)	36.30	36.61	36.92	37.24
最大功率电流 (I_{mp} /安)	8.26	8.33	8.40	8.46
开路电压 (V_{oc} /伏)	44.82	44.91	45.00	45.08
短路电流 (I_{sc} /安)	8.88	8.99	9.10	9.22
组件效率 (%)	15.46	15.72	15.98	16.23
电池额定工作温度 (NOCT)	42±3℃			
开路电压温度系数 (V_{oc})	-0.32%/℃			
短路电流温度系数 (I_{sc})	0.055%/℃			
最大功率温度系数 (P_m)	-0.44%/℃			
功率公差 (W)	0~+5			

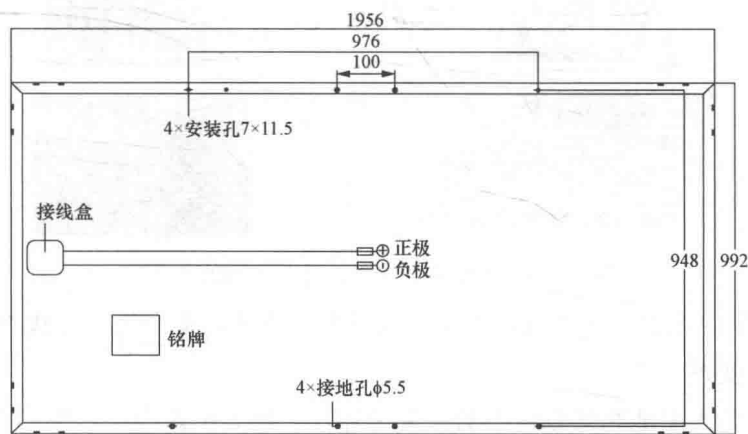


图 2-3-2 外形尺寸

四种组件内串、并联封装的电池片数量是相同的，因此其外形尺寸是一样的，但四种组件的最大功率从 300W 到 315W 不等，究其原因在于封装组件前对电池片进行过分级，

性能接近的电池片按照不同档次封装到一起，导致最终组件的输出功率差别较大，电气参数及性能也会产生较大的差别。

（三）阵列

为了使整个光伏发电系统得到最大功率输出，结合建设地点的地理、气候及太阳能资源条件，将太阳能组光伏支架系统以一定的朝向，排列方式及间距固定住的支撑结构，称为光伏阵列。



图 2-3-3 光伏阵列

（四）电池片、组件、阵列之间的关系

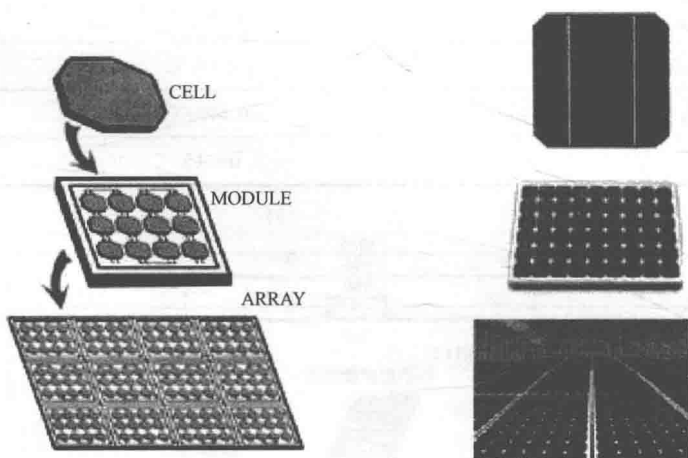


图 2-3-4 电池片、组件、阵列之间的关系

图 2-3-4 形象地说明，多个太阳能电池片封装为组件，多个组件连接为阵列。

二、并网逆变器

并网逆变器是太阳能光伏系统中的关键部件，它将太阳能电池产生的直流电通过电力电子变换技术转换为能够直接并入电网、负载的交流能量。并网逆变器的质量直接影响整个太阳能光伏系统的效率和性能。

目前比较常用的太阳能逆变器主要有：集中式并网逆变器、组串式并网逆变器、多组串逆变器和组件逆变器。

（一）集中式并网逆变器

集中式并网逆变器设备功率在 50kW 到 630kW 之间，功率器件采用大电流 IGBT，系统拓扑结构采用 DC-AC 一级电力电子器件变换全桥逆变、工频隔离变压器的方式，防护等级一般为 IP20。体积较大，室内立式安装。

集中式并网逆变器一般用于日照均匀的大型厂房、荒漠电站、地面电站等大型发电系统中，系统总功率大，一般是 MW 级以上。

1. 主要优点。

- （1）逆变器数量少，便于管理。
- （2）逆变器元器件数量少，可靠性高。
- （3）谐波含量少，直流分量少，电能质量高。
- （4）逆变器集成度高，功率密度大，成本低。
- （5）逆变器各种保护功能齐全，电站安全性高。
- （6）有功率因数调节功能和低电压穿越功能，电网调节性好。

2. 主要缺点。

- （1）直流汇流箱故障率较高，影响整个系统。
- （2）集中式逆变器 MPPT 电压范围窄，一般为 450~820 伏，组件配置不灵活。在阴雨天雾气多的部区，发电时间短。
- （3）逆变器机房安装部署困难、需要专用的机房和设备。
- （4）逆变器自身耗电以及机房通风散热耗电，系统维护相对复杂。
- （5）集中式并网逆变系统中，组件方阵经过两次汇流到达逆变器，逆变器最大功率跟踪功能（MPPT）不能监控到每一路组件的运行情况，因此不可能使每一路组件都处于最佳工作点，当有一块组件发生故障或者被阴影遮挡，会影响整个系统的发电效率。



图 2-3-5 集中式并网逆变器