

清洁可再生能源——大型聚光光伏电站

陈诺夫

人类从钻木取火开始,对能源的需求与日俱增。在近代,随着科学技术的高速发展,对能源已经产生了依赖。人类长期赖以生存的能源,如煤炭、石油和天然气等都属于化石能源。虽然还没有准确的方法可以预测化石能源究竟可以开采、使用多少年,但是随着开采技术的不断提高和对化石能源需求的急剧增长,化石能源的枯竭已经不再遥远。据估计,化石能源只能支撑大约 40~60 余年。

在化石能源之后,什么是可替代的能源?人们最关心的是能源安全,只有安全的能源,才能被人类大规模使用。同样,只有安全地获取能源,能源才能真正发挥其作用。目前,人类可以想到的可利用能源主要有:太阳能、水能、风能、生物质能、海洋能、地热能及核能。在这些能源中,目前利用最好的是水能。但是,水能的资源非常有限,远远不能满足人类的需要。核能是一种矿物质能,在地球中核原料的储量同样有限,大规模地开采同样有枯竭的一天。此外,核废料的污染是一个非常难以解决的问题。那么,在太阳能、风能、生物质能、海洋能和地热能中,究竟哪些能够成为化石能源之后的替代能源呢?

首选是太阳能,作为一种取之不尽、用之不竭、清洁无污染的绿色能源,对其有效开发利用已成为实现能源可持续发展的重中之重。从长远看,太阳能光伏发电在不远的将来会占据世界能源消费的重要地位,不但要替代部分常规能源,而且将成为世界能源供应的主体。根据欧盟联合研究中心(JRC)的预测,到 2030 年可再生能源在总能源结构中占到 30%以上,太阳能光伏发电在世界总电力的供应中达到 10%以上;2040 年可再生能源占总能耗 50%以上,太阳能光伏发电将占总电力的 20%以上;到 21 世纪末,可再生能源在能源结构中占到 80%以上,太阳能发电将占到 60%以上,显示出重要战略地位。

经过各国光伏工作者的不懈努力,到目前为止,第一代晶体硅太阳能电池的实验室效率达到了 24.7%,大规模生产商用产品的效率为 17%以上。尽管如此,由于受单晶硅材料价格及繁琐的加工工

艺限制,致使单晶硅太阳能电池成本居高不下。第二代薄膜太阳能电池也取得了令人瞩目的成就,CuInSe₂(铜铟硒)和 CdTe(碲化镉)等薄膜电池的实验室效率目前分别为 16.5%和 18.5%,虽然仍有望在效率上进一步突破,但前者稳定性差,后者又较难制作,而且由于 Cd 具有较强的毒性,很多国家已经禁止使用含 Cd 的制品。非晶硅及氢化非晶硅的来源较广,但是转换效率较低且大面积薄膜制作也存在价格高的问题。相比之下,GaAs(砷化镓)基的太阳能电池 30%乃至更高的效率独具优势,但是砷化镓的材料成本远高于硅电池的材料成本,而电池片的价格是光伏系统成本最主要的部分。因此,高额成本成为制约光伏发电大规模应用的主要障碍。

为了进一步降低光伏发电成本,减少太阳能电池芯片的消耗,聚光技术是一项可行的措施,即通过采用廉价的聚光系统,将太阳光汇聚到面积很小的高性能光伏电池上,从而大幅度降低系统的成本及昂贵的太阳能电池材料用量。理论估算表明,聚光光伏发电成本完全可以达到大规模应用所接受的价格范围。

各国光伏工作者也不断地以实验结果验证,聚光技术将是在提高太阳能电池转换效率的前提下,大幅度降低电池片的消耗量和光伏发电成本的最有效方案。早在 1989 年,GaAs/GaSb(砷化镓/锑化镓)机械叠层双结太阳能电池的效率已经达到 32.6%(AM1.5, 100-suns)。1995 年德国 Fraunhofer ISE 和 Calibration 实验室研制的 Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs(镓铟磷/砷化镓)双结级联太阳能电池,效率为 31.1%(AM1.5, 300-suns)。2005 年 5 月,美国可再生能源实验室报道其三结太阳能电池在 10 倍聚光条件下的效率为 37.9%。2005 年 6 月,美国 Spectrolab(光谱实验室)公司报道其多结太阳能电池在 236 倍聚光条件下的效率为 39%。2006 年 12 月,该项世界纪录又被其刷新为 40.7%,这次突破可使安装成本降至 3 美元/瓦,发电成本约 8~10 美分/千瓦时,这在利用太阳能发电方面树立了新的里程碑。马丁·格林等人给出了截止到 2006 年底报道的各种地面应用聚光太阳能电池和模块的效率(表 1)。

表 1 2006 年底各种地面应用聚光太阳能电池和模块效率

	分类	效率 (%)	面积 (cm ²)	强度聚光比 (suns)	测试中心 (月/年)
单结电池	GaAs	27.8±1.0	0.203	216	Sandia (8/88)
	Si	26.8±0.8	1.60	96	FhG-ISE (10/95)
	Si	27.6±1.0	1.00	92	FhG-ISE (11/04)
	CIGS (薄膜)	21.5±1.5	0.102	14	NREL (2/01)
多结电池	GaInP/GaAs/Ge (2 端)	34.7±1.7	0.267	333	NREL (9/03)
	GaInP/GaInAs/Ge (2 端)	39.3±2.3	0.378	179	NREL (8/06)
	GaInP/GaInAs/Ge (2 端)	40.7	—	236	Spectrolab (12/06)
子组件	GaInP/GaAs/Ge	27.0±1.5	34	10	NREL (5/00)
组件	Si	20.3±0.8	1875	80	Sandia (4/89)

为了打开实用化的市场，美国 Amonix 公司和 SunPower 公司经过 15 年的不断努力，近期开发了 20kW 的点聚焦菲涅尔透镜列阵，该系统安装在美国 PVUSA 和亚利桑那州的 STAR 公共服务机构。澳大利亚 Solar Research 公司一直致力于反射圆盘式聚光光伏系统，自 1996 年至今，他们先后在六个地区建成了这种聚光光伏电站，用于提供该地区人民所需的电力。美国 Entech 公司自从联邦光伏计划启动以来，一直致力于线聚焦菲涅尔透镜光伏系统的研究。马德里 Polytechnical 研究组研发了一种新型的 RXI（折射—反射—内反射）聚光光伏系统，应用这个系统，其发电成本为 0.104 欧元/(kW·h)，对于 1000 MW 系统，其发电成本为 0.033 欧元/(kW·h)。西班牙也于 2006 年在北部的纳瓦拉安装由 400 个太阳能跟踪系统组成的“聚光太阳能花园”，他们声称该系统比传统平板光伏系统能源输出增加了 35%。

毋庸置疑，采用高效聚光发电机组建造大型光伏电站是最好的选择。但是，与发达国家相比，我国聚光光伏系统研究工作起步较晚，研究水平与发达国家也存在一定的差距。因此，如何在聚光光伏领域取得突破性研究进展，我国光伏工作者任重道远。本文主要介绍聚光光伏系统的原理、核心组件、光伏电站系统构成及存在的关键问题，并对其发展前景进行展望。

一、高效聚光发电机组

通过聚光来提高太阳能电池效率并降低发电成本的概念是简单直接的。图 1 阐明了聚光光伏技术的原理。在聚光条件下，一方面，电池芯片单位面积接收的辐射功率密度大幅度地增加，太阳能电池光电转换效率得以提高；另一方面，对于给定的输出功率，可以大幅度降低太阳能电池芯片的消耗，从而降

低系统的成本。下面对这两方面进行详细地分析。

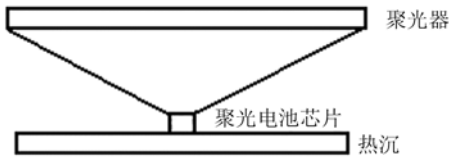


图 1 聚光光伏技术原理

聚光使太阳能电池的性能提高 太阳能电池是将太阳的光能直接转换为电能的器件，太阳能电池输出的电功率与入射的太阳光功率之比称为太阳能电池的转换效率，转换效率是衡量太阳能电池性能的重要指标。由于太阳能电池输出的电功率等于输出电流和电压的乘积，在聚光情况下，太阳能电池性能的提高主要得益于电池输出电压和电流的提高。

由于太阳照射到地球表面的光功率密度只有每平方米 1000 瓦，比较低。所以聚光太阳能电池就先用菲涅尔透镜将太阳光汇聚，再照射到太阳能电池上。菲涅尔透镜的作用与凸透镜相似，可以将平行光汇聚成一个焦斑，焦斑的光功率密度也称为聚光比。聚光太阳能电池的转换效率随着聚光比增加呈对数型增加，即电池的转换效率正比于聚光比的对数。采用菲涅尔透镜聚光以后，太阳能电池的面积由菲涅尔透镜的面积缩小到和焦斑相同，并且发出的电能比未聚光的与菲涅尔透镜面积相同的太阳能电池还要多。但是，只有正入射的太阳光才能被汇聚到电池芯片上。所以聚光太阳能电池必须配备双轴跟踪装置，使入射的太阳光时刻保持正入射菲涅尔透镜。

对日双轴跟踪装置具有两个转动轴，一个绕 x 轴转动，另一个绕 y 轴转动，分别对应经度和纬度方向。采用全球卫星定位系统，可以对双轴跟踪装

置进行时、空精确控制，也可以采用实时反馈方法对双轴跟踪装置进行精确控制，或者采用二者相结合的方式

进行控制。太阳电池发出的电是直流电，与普通电池类似，可以根据所需的电流和电压值进行串、并联连接。如果要把太阳电池发出的电输送到电网上，必须先把直流电转换成与电网频率相同的交流电，这个过程称为逆变转换。

聚光使光伏发电成本降低 对于光伏发电，太阳电池芯片的价格决定了聚光系统中约50%~55%的成本，所以如果可以大幅度降低电池芯片的消耗，便可以大幅度降低系统发电成本。

低电池芯片消耗是推动聚光光伏技术进入光伏市场的最主要动力。下面给出一个最简单的例子来说明聚光使太阳电池芯片的消耗降低。对于非聚光的平面电池，在AM1.5光谱的辐照下，直径为10cm的太阳电池芯片可以接收到7.85W的能量。而对于同样大小的晶片可以制作出52个1cm×1cm聚光太阳电池，假设聚光器工作在300倍聚光条件下，透镜透光率为85%，要想输出同样大小的功率，仅需1个1cm×1cm的电池芯片。国内外许多光伏工作者都对聚光技术使光伏发电成本的降低做了研究，图2给出了聚光太阳电池、薄膜太阳电池以及晶体硅太阳电池发电成本的对比关系。由图可见，聚光太阳电池在降低光伏发电成本方面具有极大的潜力。

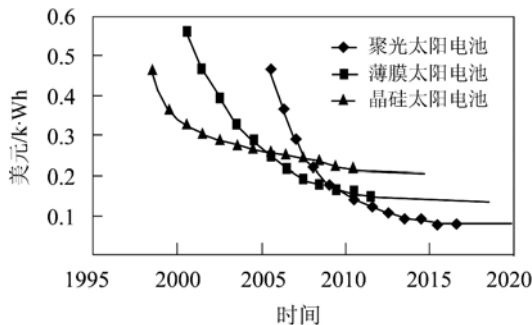


图2 聚光太阳电池、薄膜太阳电池与晶体硅太阳电池发电成本预测对比图

目前国内的平板硅电站发电成本为2~3元/(kW·h)。无锡尚德公司计划到2013年，将太阳能电池发电成本降至1元/(kW·h)。高效聚光太阳能发电机组(相当于晶体硅电池模块+安装支架)售价可望降至2美元/w，发电成本可以降至0.6元/(kW·h)。

高效聚光太阳能发电机组 高效聚光发电

机组主要由聚光太阳电池组件阵列和对日跟踪器组成，如图3所示。其中，聚光太阳电池组件是将太阳光能转化为电能的核心部件，由太阳电池阵列及与之对应的菲涅尔透镜阵列和散热片阵列，以及底板和框架构成，如图4所示。最初用于聚光太阳电池组件的是单晶硅太阳电池，随着聚光比的提高，采用多结太阳电池制作高效聚光发电机组已经成为发展趋势。



图3 高效聚光发电机组

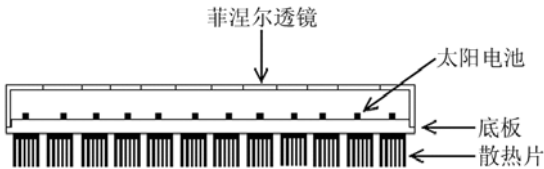


图4 聚光太阳电池组件示意图

与平板太阳电池相比，聚光光伏系统的核心部件除了高效太阳电池芯片以外，还包括聚光器和对日跟踪器。按光学类型划分，常用的聚光器通常分为折射聚光器和反射聚光器。对于实际应用来说，菲涅尔透镜成为理想之选。它的聚焦方式可以是点聚焦，也可以是线聚焦。点聚焦时，将太阳光聚焦在一个太阳电池片上；线聚焦时，将太阳光聚焦在太阳电池组成的线列阵上。在实际应用中，为了增加聚光比，或者增加聚光光束的入射角，常常使用二级光学元件。二级光学元件可以放宽初级光学元件的制造精度和聚光器的对准精度，而且降低了对高精度跟踪系统的投资，既降低了聚光光伏系统的成本又提高了系统的可靠性。图5所示为一种组合式聚光器，它由点聚焦菲涅尔透镜和导光筒组成。点聚焦菲涅尔透镜作为初级光学元件，可以获得较大的聚光比，导光筒作为二级光学元件，可将偏离电池的太阳光通过筒内壁镜面反射器的多次反射重

新投射到太阳能电池表面上，实现阳光的正向照射，从而提高了太阳能利用率和太阳能电池的光电转换效率。电功率输出特性随入射角的变化关系的测试结果表明，在 AM1.5、400 倍聚光比条件下，当输出功率为峰值功率的 90% 时，其可接收角为 $\pm 4.23^\circ$ 。与传统折射式聚光器相比，该系统具有较高的接收角，可极大地提高聚光光伏系统户外运行的稳定性和可靠性，且便于安装和维护。



图 5 组合式聚光器

对于高效聚光光伏系统来说，对日跟踪器必不可少。这主要是由于随着聚光比的提高，聚光光伏系统所接收到光线的角度范围就越小，为了更加充分地利用太阳光，聚光光伏系统必须辅以对日跟踪装置。能够精确跟踪太阳且价格低廉的对日跟踪装置一直是光伏工作者致力研究的热点之一。目前对日跟踪器的设计方案众多，形式不拘一格。点聚光结构的聚光器一般要求双轴跟踪，线聚光结构的聚光器仅需单轴跟踪。跟踪器的跟踪精度要优于 1 度，并且可以适应于高寒地区和高风沙地区长期运行。

二、大型光伏电站

建造大型光伏电站是利用太阳能的最好方法，特别在我国西藏、青海、甘肃、云南等地日照充足，并且有大量的戈壁荒地。与传统火力发电相比，太阳能光伏电站无任何污染、不消耗原材料，而且光伏电站运行成本极低。100MW 高效聚光太阳能电站每年可以发电 1.46 亿度，节省标准煤 5.84 万吨，减少 CO_2 排放 7.3 万吨。因此，发展高效聚光太阳能发电技术不但具有重大的经济效益，更具有重大的社会效益。

大型光伏电站组成 太阳能光伏电站主要由太阳能电池发电机组和控制系统组成。由于高效聚光太阳能发电机组具有转换效率高、占地面积少和

发电量多的特点，在大型光伏电站的建造中优势明显。在国际市场上，高效聚光太阳能电池和发电机组已经商品化，核心技术主要集中在美国、德国、日本和俄罗斯等发达国家，产品出口目前还受到限制。我国高效聚光太阳能电池研究起步于 21 世纪初，目前已经掌握了核心技术，但是还没有商业化的产品。

大型光伏电站控制系统的主要作用是对太阳能发电机组进行巡检、跟踪发电机组的最大发电功率、进行直流/交流转换（逆变）和向电网输电控制等。

如果采用转换效率为 35% 的聚光三结太阳能电池和 500 倍的聚光比，则太阳能发电机组的转换效率可以达到 25%。对于一座规模为 100MW，即 10 万 kW 级的大型光伏电站，需要 800 平方米的聚光三结太阳能电池。一般聚光三结太阳能电池是生长在锗单晶衬底上，锗单晶衬底是直径为 10cm 的圆片。一座规模为 100MW 的大型光伏电站，需要 12 万片直径为 10cm 的锗单晶片。而如果电站采用单晶硅平板太阳能电池，则需要近 1 亿片直径为 10cm 的单晶硅片，比高效聚光太阳能电池多耗费电池材料达 800 多倍。

大型光伏电站的运行管理 大型太阳能光伏电站的运行管理大部分是由电站的自动控制系统来执行的，其职能主要是对太阳能发电机组进行巡检、跟踪发电机组的最大发电功率、进行直流/交流转换（逆变）和向电网输电控制等。如果单台太阳能发电机组的功率为 5kW，则一座规模为 100MW 的大型光伏电站需要 2 万台发电机组。天气情况对太阳能电站的影响是非常大的，此外云朵、飞禽、落叶都会对发电机组产生局部的影响。控制系统需要对这些 2 万台发电机组进行巡回检测，发现异常及时发出警报、做出相应的处理。

虽然高效聚光太阳能发电机组具有对日自动跟踪功能，使太阳光始终保持正入射的状态，但是太阳能发电机组的输出功率仍然会随日照强度和电池温度的改变而变化。电站控制系统要根据发电机组的输出变化，使发电机组的工作点始终保持在最大功率状态。

电站的控制系统要负责将太阳能发电机组输出的直流电转换成交流电（逆变转换），并向电网或负载输送。电站的控制系统是根据预先设定的最小功率值来控制逆变和传输任务的。当早晨太阳上升、日照强度增大、太阳能发电机组的输出功率达到最小设定值以后，逆变装置开始运行、自动跟踪发电

机组的最大功率点，直至日落时发电机组的输出功率小于最小设定值以后运行停止。在阴天和雨天，如果太阳能发电机组的输出功率小于最小设定值，则整个系统处于待机状态。

除了电站控制系统的常规巡检以外，电站管理人员应对电站进行定期检查和维修，保证太阳能光伏电站的设备处于完好状态。此外，还应应对电站的周边环境进行定期检查，消除可能影响太阳能光伏电站正常运行的隐患。

三、前景展望

在各国政府的大力支持以及光伏市场的需求和聚光光伏技术迅猛提高的趋势下，高效、低廉、可靠、稳定的聚光光伏发电系统正在逐步走向产业化。2004 年，世界光伏市场上聚光光伏系统年装机量仅为 1MW，2006 年，聚光光伏系统的年装机量为 18MW，虽然数字上不是一个飞跃，远远低于 1200MW 平板光伏电池的装机量，但随着聚光光伏技术的快速发展，这一新型可再生能源系统将很快走向产业化。美国特拉华大学等二十几个单位组成的超高效太阳电池开发集团，正在研发转换效率为 50% 的超高转换效率太阳电池。目前转换效率已经突破 42.8%。

在国际光伏市场巨大潜力的推动下，中国作为世界能源消耗第二大国，对于高效、低成本的光伏发电系统的需求更为迫切。目前，我国光伏产业正

以每年 30% 的速度增长，国内光伏电池生产能力已超过 1600MW。但是，我国光伏发电的应用却远远低于国际平均水平。与国际上蓬勃发展的光伏发电相比，国内平板式光伏发电系统技术已比较成熟，而聚光光伏发电系统还处于技术开发阶段。只要我们抓住有利时机，瞄准国际光伏电池新材料及器件研究的前沿，就能在聚光光伏技术及应用方面取得突破性进展。

大型光伏电站是太阳能利用的必然趋势，在大型光伏电站的建设和运行管理过程中除了核心部件以外，还需要有合理的布局及系统的控制方法。大型光伏电站建设关系到国家的能源安全。因此，建设大型光伏电站应该是政府主导的一项战略工程，应统一规划、统筹管理。

（北京市华北电力大学可再生能源学院 102206）

作者简介

陈诺夫，华北电力大学太阳能研究中心主任、教授、博士生导师。研究领域主要为新型高效太阳电池材料、器件与发电系统，空间材料制备与性质分析。



科苑快讯

地球潮汐触发小型深层地震

一项科学分析表明，地壳潮汐般的微小压力变化能够触发沿加利福尼亚州圣安德鲁断层活跃部分的小型深层地震。加利福尼亚大学伯克利分校的地震学家托马斯（Amanda Thomas）说，这是因为同样吸引力导致的地球潮汐，也会引起地壳岩石的微弱潮汐。尽管这种频繁的压力与潮汐联系不大，却显然已足够触发沿断层走向的微小颤动。

加利福尼亚州安德鲁断层东南端的休罗梅（Cholame）小镇，地壳深处的微小震动在这里是家常便饭。托马斯说，他们的研究数据集中于小镇周围 110 平方千米地区在 2001 年 7 月~2008 年 5 月发生的 1700 多次微小地震。通过分析这些地震，她和同事发现断层对微小压力变化极为敏感，这可能是极

端高压的地下水使断层震动发生缓冲作用所致。

（高凌云编译自 2009 年 12 月 23 日 www.sciencenews.org）

比真空更隔热的装置

由于热物体会向周围空间辐射热量，因此人们都认为真空环境更能减少传导。然而美国斯坦福大学的范汕洵（Shanhui Fan）和同事发现真空环境并不能隔热，因为真空中还是有物质的。

他们以一种不能对红外线不通透的光子晶体阻止热的流动。在室温或高于室温的温度条件下，将 10 层硅胶堆叠在一起，每层以 90 微米的真空缝隙隔离，使热传导率降低为真空环境的一半。展望未来，这一技术将有广阔的应用。

（高凌云编译自 2009 年第 10 期《欧洲核子研究中心快报》）