



国家电网公司
电力科技著作出版项目

大规模光伏发电系统 及并网技术

李春来 张海宁 弓建荣 王东方 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

大规模光伏发电系统 及并网技术

李春来 张海宁 弓建荣 王东方 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

光伏发电属于间歇性能源发电,具有间歇性和波动性等特点。从电网的角度出发,针对光伏发电先进技术、光伏电站设备选型、大规模光伏电站接入系统的关键技术等方面开展相应研究,以保证大型甚至超大型光伏电站可靠并网运行十分迫切与必要。本书基于项目“大规模光伏发电系统及并网关键技术”的多年研究成果编写而成。

本书共分6章,包括概述、光伏发电关键技术、光伏电站设备工作原理及选型分析、光伏电站并网运行特性及控制技术、大规模光伏发电接入系统关键技术、典型案例。

本书可供从事光伏发电和电力系统科研、设计、调度、生产等工作的技术人员和管理人员学习使用,也可供大专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

大规模光伏发电系统及并网技术 / 李春来等著. —北京:
中国电力出版社, 2016.7

ISBN 978-7-5123-8745-4

I. ①大… II. ①李… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第016680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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 21印张 368千字

印数 0001—1500册 定价 98.00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

《大规模光伏发电系统及并网技术》

编 写 人 员

李春来 张海宁 弓建荣 王东方

杨小库 沈龙华 贾 昆

前 言

能源是国民经济的基本动力。在严峻的能源形势和人类生态环境（如气候变暖）的压力下，世界各国都把开发利用可持续的清洁能源作为未来的能源发展战略，其中太阳能以资源丰富、没有地域界线、清洁等独特优点而成为人们关注的热点之一。在技术进步和法规政策的强力推动下，太阳能光伏发电产业呈现出快速发展的势头。

我国是世界上太阳能最丰富的地区之一。全国 2/3 以上地区的年日照时数大于 2000h，年辐照量约为 $5900\text{MJ}/\text{m}^2$ ，具有良好的太阳能利用条件。光伏发电系统主要有离网型光伏发电系统和并网型光伏发电系统两种形式。并网型发电系统按照其发电方式可分为分布式光伏并网发电系统与集中式光伏并网发电系统，集中式光伏并网发电系统通常建立在太阳能资源丰富的荒漠戈壁地区，建设规模可以达到上千兆瓦，发出的电能直接并入高压输电网络，是世界各国今后发展以及研究的重要方向。

到 2015 年底，我国太阳能发电总装机容量已达到 4305 万 kW，并网光伏电站装机容量已达到 3500 万 kW。由于光伏发电与风力发电均属于间歇性能源发电，均具有间歇性和波动性的特点，大规模的光伏发电站并网将会给电网带来很大的冲击，因此，如何吸取风电发展的教训，保证大型甚至超大型并网光伏电站的可靠运行，非常有必要从电网的角度对光伏电站并网技术要求、光伏电站大规模接入电网对电网稳定性和电能质量的影响等问题进行深入研究，并提出保证太阳能发电与电网协调发展和安全运行的技术措施。本书基于项目“大规模光伏发电系统及并网关键技术”的多年研究成果编写而成。

本书共分 6 章，包括概述、光伏发电关键技术、光伏电站设备工作原理及选型分析、光伏电站并网运行特性及控制技术、大规模光伏发电接入系统关键技术、典型案例。其中，第 1 章由弓建荣编写，第 2 章和第 3 章由张海宁编写，第 4 章和第 5 章由王东方编写，第 6 章由李春来编写。李春来对全书进行了统稿。

在本书编写过程中，国网青海省电力公司电力科学研究院给予了经费支持，

同时得到了青海省电力公司、青海省发改委、相关科研院所、相关太阳能系统生产厂家和高校等单位的大力支持，在此表示衷心感谢！

可再生能源是一个发展中的领域，还有许多问题有待进一步研究。本书是一个初步研究，有待继续深入。由于编著者水平有限，书中难免存在疏漏或不足之处，诚望各界专家和广大读者批评指正。

作者

2016年2月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 全球太阳能发电发展概况	1
1.2 国内太阳能发电发展资源条件与前景	17
1.3 大规模光伏发电发展面临的挑战	24
第 2 章 光伏发电关键技术	26
2.1 光伏发电系统发电站关键技术	26
2.2 光伏发电系统电网侧关键技术	42
第 3 章 光伏电站设备工作原理及选型分析	72
3.1 电池组件工作原理及选型分析	72
3.2 汇流箱工作原理及选型分析	74
3.3 逆变器工作原理及选型分析	77
3.4 常规设备选型分析	79
第 4 章 光伏电站并网运行特性及控制技术	83
4.1 光伏发电机理与数学模型	83
4.2 光伏电站运行控制策略	91
4.3 光伏电站动态特性仿真分析	102
第 5 章 大规模光伏发电接入系统关键技术	117
5.1 大规模光伏发电的消纳与送出	117
5.2 大规模光伏发电的优化调度	141

5.3	大规模光伏发电的协调控制	174
5.4	大规模光伏发电的继电保护技术	185
第6章	典型案例	198
6.1	青海省大规模光伏发电基地介绍	198
6.2	青海省大型光伏电站典型设计	209
6.3	青海省光伏电站群接入系统典型设计	219
6.4	青海省大规模光伏电站消纳方案	253
6.5	青海省大规模光伏电站群运行控制	265
	参考文献	318
	索引	321

第 1 章

概 述

1.1 全球太阳能发电发展概况

随着全球能源保障和环境污染等问题的日益突出,人们开始将目光投向清洁可再生的新能源,希望其能改变现在的能源结构,解决能源短缺和环境污染等一系列问题,实现可持续发展的战略目标。现有的可再生能源主要有太阳能、风能、水力、生物质能等,太阳能作为一种清洁可再生的能源,以取之不尽、用之不竭、廉价、无污染等特点,使其具有其他新能源无法比拟的优势,是最理想的新能源之一。

1.1.1 总体情况

太阳能发电有两大类型:一类是太阳光发电(亦称太阳能光发电),另一类是太阳热发电(亦称太阳能热发电)。

太阳能光发电是将太阳能直接转变成电能的一种发电方式。它包括光伏发电、光化学发电、光感应发电和光生物发电 4 种形式,其中光伏发电是目前应用最广的太阳能发电方式。

1. 太阳能光伏发电发展现状及趋势

光伏发电的基本原理是光伏效应。太阳辐射的光子照射到半导体材料时,由于光电效应在半导体材料内部产生电位差,将光能转换为电能,这种现象称为光生伏特效应。光伏发电是利用光伏效应原理,将照射到太阳能电池板上的光能转化为电能的过程。目前应用最多的太阳能电池有单晶硅、多晶硅、薄膜等。

近年来,国内外光伏发电发展迅速。截至 2014 年底,全球累计安装容量接近 188.8GW,2014 年创下年度历史新高,达到 47GW。2006~2014 年全球太阳

能光伏发电装机容量如图 1-1 所示。其中，亚太地区在 2014 年约占 59% 的全球光伏市场。欧洲在 2012 年代表这一全球市场的 59%，其市场份额在 2014 年跌落了 18%，主要是受欧洲市场缩减和不断增长的全球光伏发电市场影响。光伏发电市场在美国、加拿大和智利的增长引领了市场，中东仍然处于发展中的光伏发电市场区域，因为南非市场的增长，非洲安装量接近 1GW。

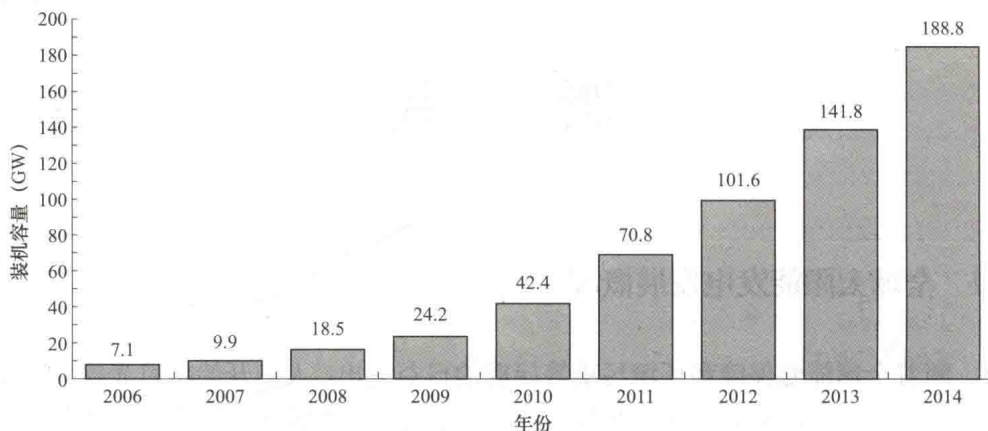


图 1-1 2006~2014 年全球太阳能光伏发电装机容量

根据国际能源署光伏电力系统项目 (IEA PVPS)，最重要的发展主要出现在中国，2013 年国家下调光伏增长目标为 10.95GW，2014 年目标下降至 10.6GW，主要是因为对分布式光伏发电能力的担忧。2014 年，第二大太阳能光伏发电市场是日本，有 9.7GW，超过美国 (6.2GW) 和欧洲 (英国为 2.3GW，德国下降为 1.9GW 和法国为 1GW)。

2014 年堪称可再生能源的基准年——欧洲可再生能源发电量首次超越核电。据相关报告预算，2020 年全球累计太阳能光伏发电装机量将至 540GW，而 2014 年则以 47GW 的装机量刷新了历史纪录。其中，全球主要地区新增光伏发电装机容量和所占比例如图 1-2 和图 1-3 所示。

2014 年，中国、日本、美国三个市场继续保持 2013 年的明显优势，装机容量分别为 10.5、9.7GW 和 6.5GW。欧洲市场装机量已经连续三年下滑，尽管英国光伏产业得以强劲增长，但德国和意大利市场进一步下滑，整体装机规模预计为 7GW 左右。新兴市场方面，2014 年印度、南非、智利等市场均呈现迅猛发展态势。日本以 9.7GW 的新增装机容量成为全球第二大太阳能光伏发电市场，美国与欧洲分别位列第三、第四位。美国、英国、德国和法国的新增装机分别为 6.2、2.3、1.9GW 和 1GW。

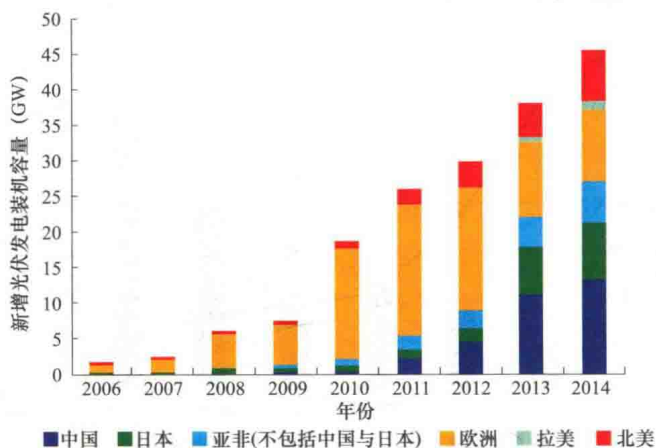


图 1-2 全球主要地区新增光伏发电装机容量

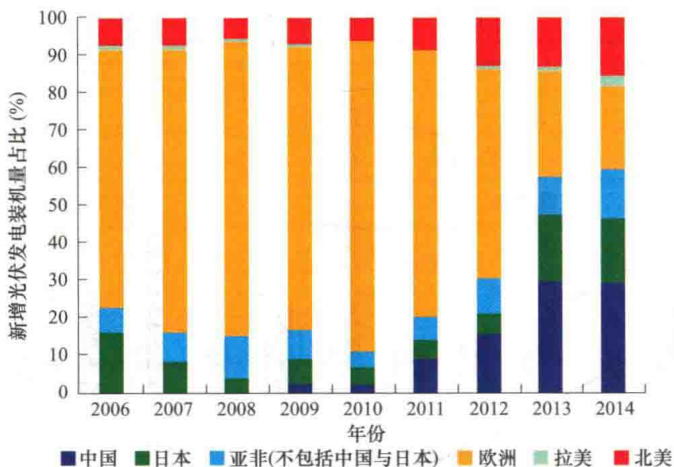


图 1-3 全球主要地区新增光伏发电装机容量占比

美国市场 2014 年保持了稳定的发展，三季度光伏装机容量达到 1.35GW，较 2013 年同期上涨 41%，是美国有史以来第四次单季装机容量超过 1GW。其中住宅系统装机容量为首次单季装机容量超过 300MW，较 2013 年同期上涨 58%；非住宅系统装机容量同比环比均出现下滑，较 2013 年同期装机容量下降 3%；公共事业级装机容量在 2014 年三季度达到 825MW，此类发电项目已经成为美国开发商开发主流。图 1-4 为 2011~2016 年美国光伏发电装机情况。

德国作为曾经全球光伏发电装机容量最多的国家，受政策削减影响，近两年来装机容量不断下滑。2014 年上半年，德国新增光伏发电装机容量大约为 1GW，

与 2013 年同比减少 43.5%，全年装机容量不足 2GW，见图 1-5。

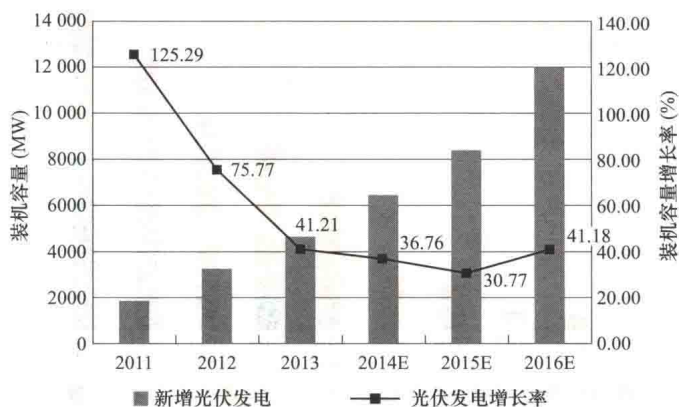


图 1-4 2011~2016 年美国光伏发电装机情况

数据来源: GTM research, SEIA, SinoRating。

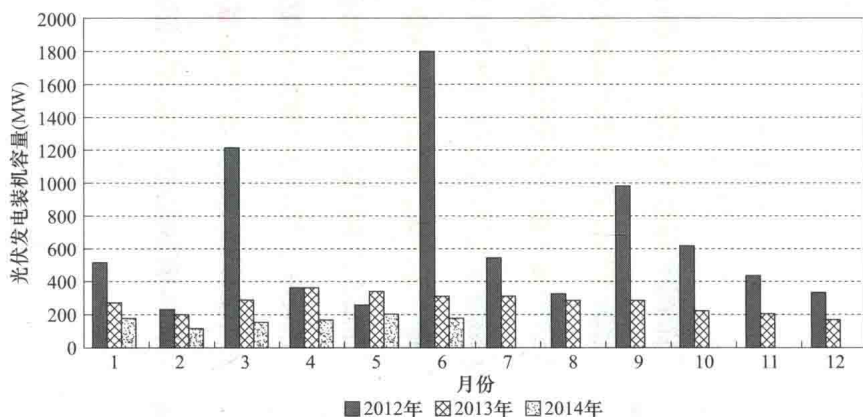


图 1-5 2012~2014 年德国光伏发电装机容量

欧洲光伏工业协会 (EPIA) 对未来光伏发电的发展进行了预测，图 1-6 是其对 2006~2030 年全球光伏发电总装机容量和年度装机容量的预测图，表 1-1 是其对光伏发电总发电量占全球总发电量的比例及年度减排 CO_2 量预测。

从图 1-6 可以看出，按快速发展模式，2030 年全球光伏总装机容量为 1864GW，总发电量为 2646TWh，根据国际能源组织 IEA 年度发电量预测，占当年总发电量的 8.90%，减排 CO_2 量为 1588Mt；2030 年，按正常发展模式，全球光伏总装机容量为 912GW，总发电量为 1291TWh，占当年总发电量的 4.34%，减排 CO_2 量为 755Mt。

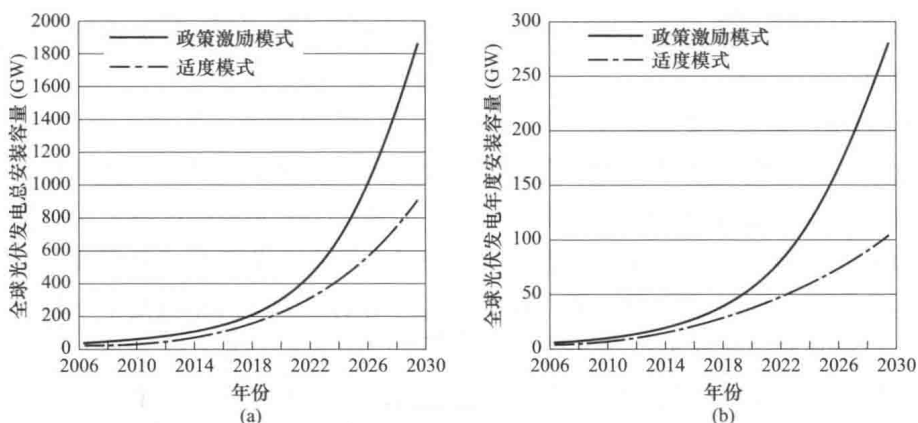


图 1-6 EPIA 对 2006~2030 年全球光伏发电总装机容量和年度装机容量的预测图
(a) 全球光伏发电总装机容量；(b) 全球光伏发电年度装机容量

表 1-1 EPIA 对光伏发电总发电量占全球总发电量的比例及年度减排 CO₂ 量预测

项 目	2007 年	2010 年	2020 年	2030 年
加速发展模式				
年度装机容量 (GW)	2.4	6.90	56	281
总装机容量 (GW)	9.20	25.4	278	1864
光伏发电总发电量 (TWh)	10	29	362	2646
占全球总发电量比例 (%)	0.07	0.16	2.05	8.90
年度减排 CO ₂ (Mt)	6	17	217	1588
正常发展模式				
年度装机容量 (GW)	2.4	5.30	35	105
总装机容量 (GW)	9.20	21.6	211	912
光伏发电总发电量 (TWh)	10	24	283	1291
占全球总发电量比例 (%)	0.07	0.14	1.20	4.34
年度减排 CO ₂ (Mt)	6	15	170	775

从全球来看，欧洲市场已经主导全球光伏发电市场多年，但是其他国家和地区的增长潜力不容小觑。受能源需求的拉动，未来光伏发电市场增速较快的国家和地区依次是中国、印度、东南亚、拉丁美洲、中东和北美。那些光照资源丰富、光伏发电成本已可与柴油发电机的峰值发电价格相当国家和地区，在 2020 年将可达到 60GW~250GW 的新增装机容量，2030 年将达到 260GW~1100GW。

随着光伏产品价格的进一步下降，越来越多的国家将会在 10 年内使用上平价的光伏发电。

2. 太阳能热发电发展现状

太阳能热发电主要是利用聚光器将低密度的太阳能汇聚到焦斑处，使其生成高密度的能量，然后通过传热介质将其转化为热能，再利用热能发电。根据聚热方式和热能利用方式的不同，主要分为：槽式、塔式、菲涅尔式和碟式，这些方式主要是利用不同技术加热工质，最后都要利用工质驱动汽轮机发电，目前仅有槽式太阳能热发电得到商业化应用。太阳能热发电有转动和高温部件，维护要求很高，尤其是需要水或其他液体作为传热工质，因而不利于在沙漠等空旷干旱地区大规模利用，和光伏发电相比，应用场合和范围严重受限。因此，虽然目前太阳能热发电初期投资和发电成本均比光伏发电低，但大规模利用技术更加复杂，目前仍处于试验、探索阶段。

截至 2013 年底，全球太阳能热发电安装容量已经超过 2.8GW，西班牙和美国依然是传统的太阳能热发电应用大国，阿联酋、埃及、阿尔及利亚、摩洛哥、伊朗等国家均有超过 10MW 的应用。国际能源署预计，随着技术的发展，到 2020 年全球太阳能热发电（CSP）装机容量将超过 2 亿 kW。

1.1.2 光伏发电关键技术的发展

光伏发电是根据光生伏特效应，利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能。根据其与电网的连接方式可分为离网型太阳能光伏发电系统和并网型太阳能光伏发电系统两大类。经过多年的发展，光伏发电已成为一种较为成熟、可靠的技术，并已逐渐从独立系统向大规模并网方向发展。

光伏发电的发电成本较高，采用先进技术有效降低发电成本，成为光伏发电发展的关键技术之一。目前采用的技术包括太阳级多晶硅（SOG）制备技术、硅锭线切割技术和高效低成本太阳能电池技术等。

1. 太阳级多晶硅制备技术

目前，国际上传统的多晶硅制备技术主要有改良西门子法、硅烷法和流化床法。这些技术定位于电子级硅（Electronic Grade Silicon, EGS）（9N 纯度即 99.999 999 9% 以上）生产，兼顾太阳级硅（Solar Grade Silicon, SOGS）（6N 纯度即 99.999 9% 以上）制备。

最初，多晶硅主要用于半导体领域，技术门槛高，投资规模大，收益时间长，这些技术主要掌握在美国 Hemlock 和 MEMC 公司（包括美国及意大利公司），日本住友 Tokuyama 公司、三菱 Mitsubishi 公司（包括美国及日本公司）和德山 Sumitomo 公司，德国 Wacker 公司，挪威 REC 公司（包括 Asimi 和 SGS）四个

国家的七个生产厂家中，形成技术封锁和垄断（明确表示不会对我国进行技术转让）。

2013年，全球多晶硅产能、产量排前十名的公司的状况是：中国保利协鑫（GCL—Poly）公司，产能46 000t/年，产量31 000t/年，排名全球第一；德国瓦克（Wacker）公司产能42 000t/年，产量31 000t/年，排名全球第二；韩国东方化学工业（OCI）公司产能42 000t/年，产量30 000t/年，排名全球第三；美国汉姆洛克（Hemlock）公司，产能36 000t/年，产量30 000t/年，排名全球第四。排名第五到第十的公司分别是挪威REC公司产能19 500t/年，产量16 000t/年、中国赛维LDK产能17 000t/年，产量11 000t/年、美国MEMC产能15 000t/年，产量12 000t/年，日本M.Setek公司产能15 600t/年、产量11 000t/年和日本Tokuyama公司产能9 200t/年、产量9 000t/年，中国洛阳中硅公司产能5 000t/年、产量4 000t/年。2013年全球多晶硅产能、产量排前十名的公司详见表1-2。

表 1-2 2013 年全球多晶硅产能、产量排前十名的公司

序号	公司名称	产能 (t/年)	产量 (t/年)	备注
1	中国保利协鑫公司	46 000	31 000	改良西门子法
2	德国瓦克公司	42 000	31 000	改良西门子法、流化床法
3	韩国 OCI 公司	42 000	28 000	改良西门子法
4	美国 Hemlock 公司	36 000	30 000	改良西门子法、流化床法
5	挪威 REC 公司	19 500	16 000	改良西门子法、流化床法
6	中国赛维 LDK 公司	17 000	11 000	改良西门子法
7	美国 MEMC 公司	15 000	12 000	流化床法
8	日本 M.Setek 公司	15 600	11 000	改良西门子法
9	日本 Tokuyama 公司	9200	9000	改良西门子法、硅烷法、气液法
10	中国洛阳中硅公司	5000	4000	改良西门子法

近年来硅料行业整合充分，全球范围内已经形成寡头垄断的局势。按照2013年实际出货量统计，美国汉姆洛克（Hemlock）、德国瓦克（Wacker）、韩国东方化学工业（OCI）、中国保利协鑫（GCL—Poly）四大巨头加起来占比超过74%。

现有的多晶硅生产工艺技术主要有改良西门子法、硅烷法、流化床法、氯硅烷还原法（Na还原法、Zn还原法、等离子氢还原法）、重掺硅废料制备法、冶金级硅精炼法（湿法精炼、火法精炼和定向凝固）等。其中，应用最多的是改良西门子法、硅烷法、流化床法、冶金法。

(1) 改良西门子法。改良西门子法又称闭环式三氯氢硅氢还原法，其原理是用氯气 (Cl_2) 和氢气 (H_2) 合成氯化氢 (HCl)， HCl 和工业硅粉 (粗硅, Si) 在高温下合成三氯氢硅 (SiHCl_3)，然后对三氯氢硅进行化学精制提纯，再经多级精馏，使其纯度达到 9 个 9 以上，其中金属杂质总含量应降到 0.1×10^{-9} 以下，提纯精馏后的 SiHCl_3 在氢还原炉内进行 CVD (化学气相沉淀) 反应生产高纯多晶硅。改良西门子法具备节能、降耗、回收利用生产过程中伴随产生的大量 H_2 、 HCl 、 SiCl_4 等副产物以及大量副产热能的配套工艺。目前世界上绝大部分生产厂家均采用改良西门子法生产太阳能级与电子级多晶硅。

(2) 硅烷法。硅烷法又称硅烷热分解法，它是一种以硅烷为提纯的中间产物，其生产原理是以氟硅酸、钠、铝、氢气为主要原辅材料，通过四氯化硅氢化法、硅合金分解法、氢化物还原法、硅的直接氢化法等方法制取硅烷，然后将制得的硅烷提纯后在热分解炉生产纯度较高的棒状多晶硅。其关键步骤是制备中间产物硅烷，目前应用最广的制备方法有：① 硅化镁法。它是由日本 Komatsu 发明的，其原理是使 Mg_2Si 与 NH_4Cl 在液氨中发生反应生成硅烷，这种方法原料耗量大、成本高、危险性大，目前只有日本的 Komatsu 在使用该方法。② SiF_4 法。该配制方法以 SiF_4 与 NaAlH_4 为原料制备硅烷，由美国 MEMC 公司采用。③ 歧化法。以冶金级硅为原料，通过生成中间产物 SiHCl_3 而制取硅烷，其副产物 SiCl_4 和 H_2 都可以循环使用，这种制备方法由美国 Union Carbide 发明，是目前制备硅烷的主要方法。硅烷热分解法具有反应温度低、转化率高等优点，但由于硅烷制造成本高、易燃、易爆、安全性差等缺点，致使硅烷热分解法的应用不及改良西门子法。

(3) 流化床法。流化床法是以 SiCl_4 、 H_2 、 HCl 和 Si 为原料在流化床内 (沸腾床) 高温高压下生成三氯氢硅，将三氯氢硅再进一步歧化加氢反应生成二氯二氢硅，继而生成硅烷气。这种制备方法生产效率高，电耗与成本低，适用于大规模生产太阳能级多晶硅，但由于其生产的多晶硅纯度不高，因此，此法比较适合生产廉价的太阳能级多晶硅。目前，采用该方法的公司有挪威 REC 公司、德国 Wacker 公司、美国 Hemlock 公司和 MEMC 公司等。

(4) 冶金法。冶金法制备太阳能级多晶硅，是指以冶金级硅 (Metallurgical Grade Silicon, 简称 MG-Si) 为原料 (98.5%~99.5%)，采用冶金手段 (如真空精炼、造渣、氧化还原精炼、等离子体精炼、电子束精炼、定向凝固、湿法冶金等) 进行提纯制得纯度在 99.999 9% 以上用于生产太阳能电池的多晶硅原料的方法。冶金法在为太阳能光伏发电产业服务上，存在成本低、能耗低、产出率高、投资门槛低等优势，通过发展新一代载能束高真空冶金技术，可使纯度达到 6N

以上，并在若干年内逐步发展成为太阳能级多晶硅的主流制备技术。

改良西门子法具有工艺成熟、安全性高的优点，是国内外多晶硅生产厂家首选的制备 EGS 与 SOGS 的方法，采用改良西门子法所生产的多晶硅占当今世界总产量的 70%~80%。但是由于改良西门子法具有产率低、能耗高、投资资本大、资金回收慢、副产物多等缺点，所以硅烷法与改良西门子法是未来发展的两种主要方法。

传统工艺可产出纯度较高的多晶硅，但由于中间牵涉到许多副产品的控制与处理，技术难度较高，依照不同技术来源，成本各异。大部分化学法都需利用冶金级硅（MGS）（纯度在 99%以上）来当作硅化合物的原料，少数是直接利用二氧化硅矿石来制备硅化合物。

除了传统工艺（EGS 和 SOGS 兼容）技术升级外，国内外也涌现出了几种专门生产 SOGS 的工艺技术，其中有代表性的是冶金法。

2. 硅锭线切割技术

降低硅片厚度是减少硅材料消耗、降低晶体硅太阳能电池成本的有效技术措施。20 世纪 70 年代至目前的 30 多年来，太阳能电池硅片厚度从 450~500 μm 降低到 170~200 μm ，降低了一半以上，硅材料用量大大减少，对太阳能电池成本降低起到了重要作用，图 1-7 为 2009~2015 年硅锭线切割技术进步图，现每峰瓦（Wp，1Wp=1W/m²）太阳能电池耗硅量 8~8.5g。

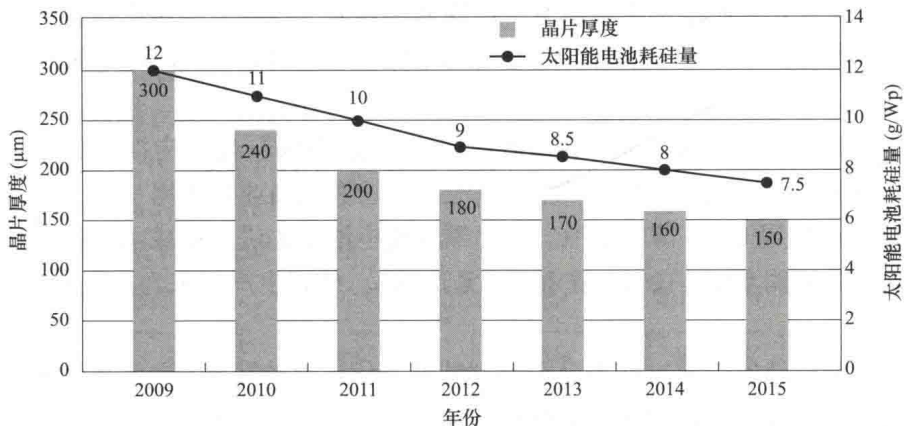


图 1-7 2009~2015 年硅锭线切割技术进步图

实际切割过程中，硅片的厚度为 0.18~0.22mm，金属切割丝线的直径约为 0.18mm，而切割的缝隙宽度会稍大于金属切割丝线的直径，与硅片厚度相当。

3. 高效低成本太阳能电池技术

太阳能电池技术进步非常明显，目前国际各类太阳能电池实验室最高光电转