DAGUIMO GUANGFU FADIANZHAN
JIANSHE YU YUNXING WEIHU

大规模光伏发电站建设与运行维护

主　编　李春来
副主编　张海宁　杨小库　贾　昆



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAGUIMO GUANGFU FADIANZHAN
JIANSHE YU YUNXING WEIHU

大规模光伏发电站建设与运行维护

主　编　李春来
副主编　张海宁　杨小库　贾　昆

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是作者及其课题组在多年研究项目“大规模光伏发电建设与运行维护”的基础上编写而成。

本书共 7 章，包括概述、光伏发电相关政策法规与标准、光伏发电工程投资与造价、光伏发电站的勘测与设计、光伏发电站接入系统技术管控、光伏发电站施工与验收和光伏发电站运行维护与事故处理。

本书可供电力系统、光伏发电领域从事科研、设计、调度、生产等工作的工程技术人员学习使用，也可供大专院校相关专业广大师生阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

大规模光伏发电站建设与运行维护/李春来等主编．—北京：中国电力出版社，2018.5

ISBN 978-7-5198-1735-0

Ⅰ．①大…　Ⅱ．①李…　Ⅲ．①光伏电站－建设②光伏电站－运行③光伏电站－维修　Ⅳ．①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 027069 号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：罗翠兰（010-63412428）
责任校对：李　楠
装帧设计：张俊霞　赵姗姗
责任印制：邹树群

印　　刷：三河市百盛印装有限公司
版　　次：2018 年 5 月第一版
印　　次：2018 年 5 月北京第一次印刷
开　　本：710 毫米×980 毫米　16 开本
印　　张：17.75
字　　数：283 千字
印　　数：0001—1500 册
定　　价：85.00 元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

《大规模光伏发电站建设与运行维护》

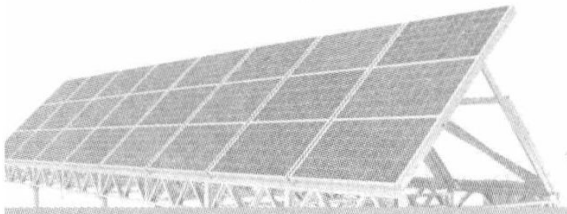
编 写 人 员

主　编　李春来

副主编　张海宁　杨小库　贾　昆

参　编　弓建荣　沈龙华　柴元德　孟可风

董开岩　杨立滨　杨　军　李正曦　苟晓侃



前言

随着全球以石油、天然气和煤炭等为主的化石能源的逐步消耗，能源危机成为世界各国共同面临的课题。与此同时，化石能源造成的环境污染和生态失衡等一系列问题也成为制约社会经济发展甚至威胁人类生存的严重障碍。新能源应用正成为全球的热点。太阳能资源是最丰富的可再生能源之一，它分布广泛，可再生，不污染环境，是国际上公认的理想替代能源。

可再生能源是国际关注的主要研究领域，事关能源发展的方向与国家战略。随着我国社会经济的快速发展及技术进步，特别是能源与环境问题的日益突出，可再生能源受到国家及社会各界乃至世界各国越来越多的关注。为促进我国可再生能源的健康发展，国网青海省电力公司电力科学研究院于2011年组织相关专家结合青海省可再生能源的开发进展情况，启动了“大规模光伏发电建设及运行维护管理”咨询研究项目。根据研究工作的需要，项目分为国内外光伏发展特点以及光伏发电政策法规与标准指南、光伏发电投资和造价管理、光伏发电站勘测与设计、光伏发电站接入系统管理、光伏发电站施工与验收、光伏发电站运行维护与管理等方面，开展了一系列的研究。

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（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以上地区的年日照大于2000h，年辐照量约为5900MJ/m^2，具有良好的太阳能利用条件。目前我国的太阳能光伏发电系统有三种形式：第一种是为解决我国边远地区人民生活用电和某些特殊生产用电而建立的独立电站系统；第二种是为城市美观、节能环保而建立的小型并网建筑光伏发电站系统；第三种是建立在太阳能资源丰富地区的荒滩戈壁处的大型和超大型并网光伏发电站系统。大型和超大型并网光伏发电

站系统建设规模可以达到数十兆瓦甚至上百上千兆瓦，发出的电能直接并入高压输电网络，是世界各国未来可再生能源发电的重要发展方向。根据我国政府制定的太阳能发电发展规划，2015 年底我国太阳能发电总安装容量达到3500MW。光伏发电属于间歇性能源，大多数光伏发电站建立在土地宽阔、自然环境恶劣的地区，随着大规模光伏发电的建设及并网，给电网带来的一些隐患也逐渐显现出来，亟须总结经验教训，为将来大型甚至超大型并网光伏发电站的安全、经济、高效运行提供技术支持与理论依据。

本书是作者及其课题组在多年研究项目“大规模光伏发电建设及运行维护”的基础上编写而成。

本书共 7 章，包括概述、光伏发电相关政策法规与标准、光伏发电工程投资与造价、光伏发电站的勘测与设计、光伏发电站接入系统技术管控、光伏发电站施工与验收和光伏发电站运行维护与事故处理。

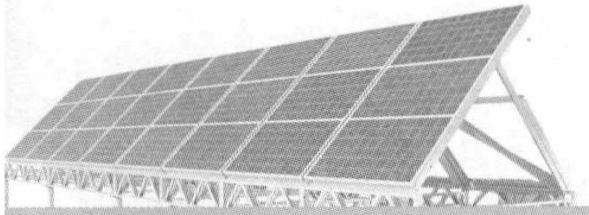
本书由李春来主编，第 1 章由张海宁编写，第 2 章和第 3 章由贾昆编写，其余章节由李春来编写并对全书统稿，杨小库、弓建荣、沈龙华审阅了主要章节的书稿，韦强、孟可风修订并设计了本书的章节框架，柴元德、孟可风、董开岩、杨立滨、杨军、李正曦、苟晓侃等人参与了编写工作。

本书编制过程中，国网青海省电力公司电力科学研究院给予经费支持，同时得到了青海省电力公司、青海省发改委以及相关科研院所、相关太阳能系统生产厂家、高校等单位的大力支持。

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成果，有待继续深入，诚望各界专家和广大读者提出各种意见和建议。同时，限于作者水平，本书难免有疏漏或错误之处，敬请读者批评指正。

编　者

2018 年 1 月



目 录

前言

第 1 章　概述 …… 1

1.1　国外光伏发展状况 …… 3

1.2　国内光伏发电发展概况 …… 14

第 2 章　光伏发电相关政策法规与标准 …… 23

2.1　光伏发电相关政策法规 …… 25

2.2　光伏发电相关标准 …… 38

第 3 章　光伏发电工程投资与造价 …… 51

3.1　光伏发电工程投资 …… 54

3.2　光伏发电工程造价 …… 72

第 4 章　光伏发电站的勘测与设计 …… 111

4.1　光伏发电站的勘测 …… 113

4.2　光伏发电站的设计 …… 122

第 5 章　光伏发电站接入系统技术管控 …… 189

5.1　光伏发电站接入系统评审计划申请和批复 …… 191

5.2　光伏发电站接入系统设计评审 …… 193

5.3　光伏发电站接入电网意见函申请和答复 …… 194

第 6 章　光伏发电站施工与验收 …… 197

6.1　光伏发电站的施工管理技术监督与支持 …… 199

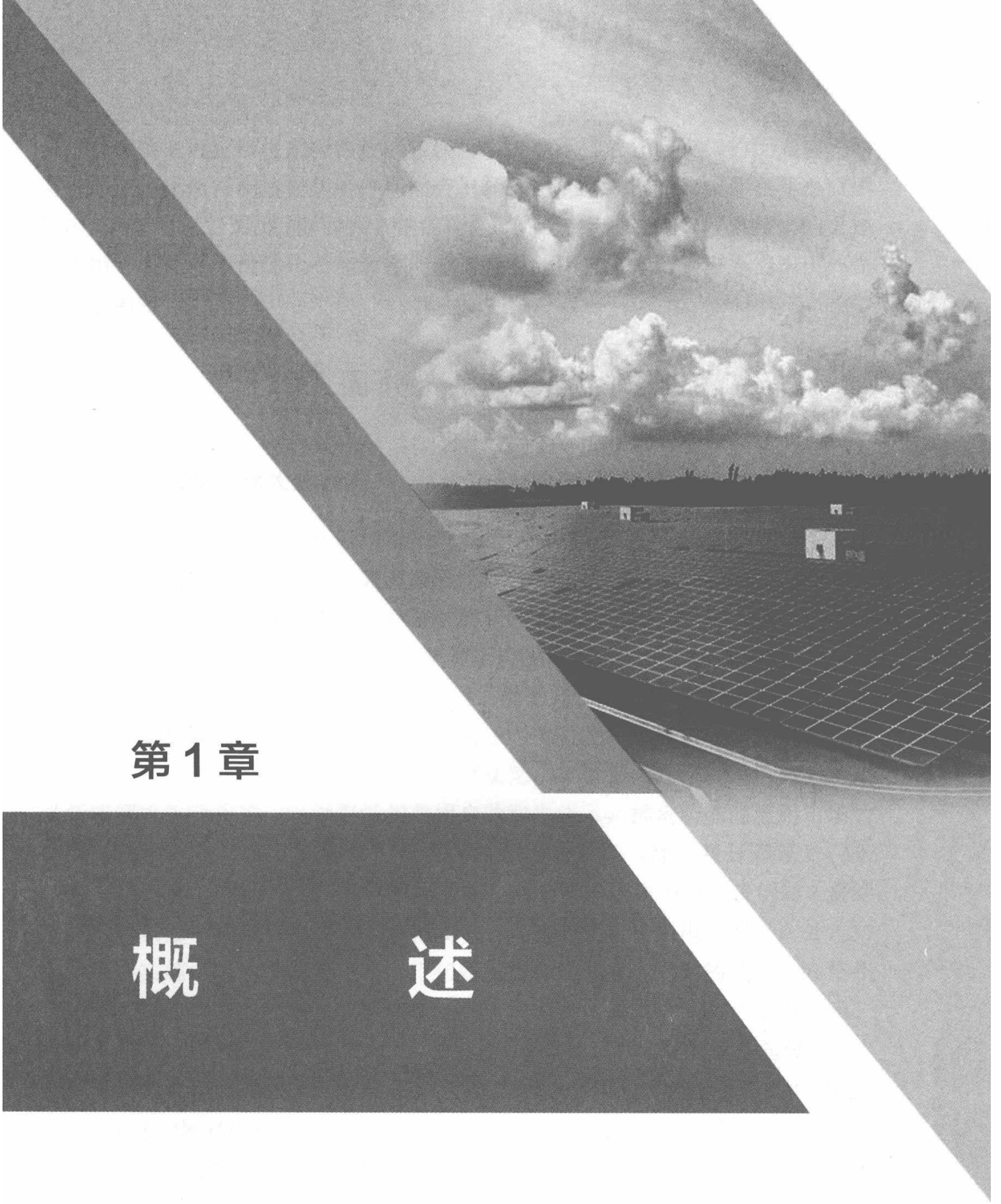
6.2　光伏发电站的验收 …… 216

第 7 章　光伏发电站运行维护与事故处理 …… 233

7.1　光伏发电站运维规章制度 …… 235

7.2 光伏发电站运维与调试策略 …… 244
7.3 光伏发电站设备事故处理措施 …… 264
7.4 光伏发电站运维人员培训 …… 271

参考文献 …… 273



第1章

概　　述

光伏发电可直接将太阳辐射能转换为电能而不排放任何废气的优点被人们寄予厚望。虽然在制造光伏组件期间会消耗一定能量，但光伏组件在其寿命周期内却能产生大于制造能耗约 10 倍的能量。人们希望通过光伏发电技术的大规模应用来大幅减少传统化石能源在能源消耗中的比重。本章重点介绍国内外光伏发展的特点。

1.1 国外光伏发展状况

1.1.1 美国光伏发展状况

美国光伏产业近年来在联邦和州政府相继出台光伏扶持政策的背景下，实现了光伏市场的高速发展。在联邦政府层面，在直接投资上，对太阳能和风能项目的投资占到了美国财政部门对各类项目投资拨款计划总额的 30%。在新能源电力并网便利化措施上，美国联邦能源管理委员会（Federal Energy Regulatory Commission，FERC）目前正在草拟法规，要求电力公司必须具备接纳新能源发电企业短时输电计划（由 1h 缩短到 15min）的能力，以便更好地监测和管理新能源电力的输出情况。美国联邦政府立法部门正筹划旨在便利化电力公司输送新能源电力的改革，以便降低相关用户的购电成本，推进新能源应用市场的扩展。在州政府层面，美国目前已有 42 个州通过了《净电量计量法》（*Net Metering Rule*），即允许光伏发电应用主体在向公网输送电力时电表倒转，最终按照净电表显示数据从电力企业获得发电收入或向其支付用电费用。此外，37 个州政府实施了对光伏发电项目进行初始投资补贴或发电补贴的政策。26 个州实施了针对光伏发电的税收优惠政策，如对户用光伏屋顶最高减免 2 万美元、对非户用建筑最高减免 50 万美元等。21 个州对光伏项目实施利率不超过 7.5%、期限最长 20 年的贷款优惠政策。30 个州出台了《可再生能源投资组合标准》（*Renewable Portfolio Standard*），其中的 17 个州规定了具体的光伏电力供给配额或分布式发电供给配额。这些政策极大地提高了美国企业投资光伏项目和美国消费者使用光伏电力的积极性和义务性，促进了美国光伏产业的腾飞。

正是在上述联邦和州政府层面相关政策措施的刺激下，2009 年起美国年度新增光伏装机容量实现了飞速增长，由 2008 年的 0.342GW 和 2009 年的

0.477GW 猛增至 2010 年的 0.878GW 和 2011 年的 1.855GW。美国累计光伏装机容量则由 2008 年的 1.173GW 和 2009 年的 1.650GW 跃升至 2010 年的 2.528GW 和 2011 年的 4.383GW。自 2010 年以来，美国光伏发展持续强劲，2013 年累计装机容量突破 10GW。与其他光伏应用的领先国家相比，美国光伏市场在过去几年的增长相对稳定，但仍然经历了两次波折，分别为 2008 年及 2011 年。第一次，美国联邦投资税收抵免政策（ITC）最初自 2005 年开始施行至 2008 年底止，而 2008 年光伏产业由于不确定该政策是否会延长而引发了一轮抢装潮，2008 年新增装机容量 298MW，环比增长 86.25%。2008 年 12 月，联邦政府决定将 ITC 政策延长 8 年，2009 年市场增速放缓。第二次，2009 年签署的 1603 法案计划于 2011 年 2 月到期，由此引发，2010 年美国光伏装机容量的激增，达到 848MW，环比增长率达 94.04%；随着 1603 法案[1]延期至 2012 年 1 月，又引发了 2011 年新一轮的装机容量激增，达到 1.89GW，环比增长 122.52%。2012 年装机容量增速有所回落，至 75.57%。2013 年装机容量仅为 3.8GW，较上年增长 15.91%。根据美国太阳能行业协会（SEIA）和研究机构 GTM 的数据显示，2016 年美国光伏新增装机容量高达 14.76GW，同比增长高达 102.2%，多个州政府继续加大对光伏产业的支持力度，加上成熟的商业运作模式，美国光伏应用市场发展长期向好，同时带动美国光伏制造业就业人数快速增长。2017 年第一季度，美国新增装机 2.04GW，第二季度为 2.387GW，同比增长 8%。

光伏产业虽然是一个新兴产业，但本质上还是以加工为主的制造型产业。通过上面的数据可以看出，美国光伏产业呈周期性波动，主要受宏观经济与产业政策及光伏发电成本和产业产能扩张与收缩的影响。

首先，由于光伏发电的不稳定性及目前在经济性上与传统能源的差距，光伏产业需要大规模依赖政府补贴。目前美国光伏市场存在的最大不确定性为政策的不确定性。一方面，联邦政府的光伏投资减免税政策计划于 2016 年到期，届时是否会延期不得而知。但根据前两轮政策到期引发的抢装潮经验，可以判断在 2016 年之前投资减免税政策的到期势必会引发新的抢装；另一方面，在州

[1] 美国 1603 再生能源法案。2009 年 2 月，奥巴马签署了“经济刺激法案，其中第 1603 条规定（简称 1603 法案）：可再生能源项目完成后，美国财政部在 60 天内必须以现金形式返还项目成品的 30%。”

政府层面，加州光伏产能占全美40%，加州光伏市场在全美占重要地位。加州太阳能计划（CSI，全美最大的电力用户分摊补贴法案）计划于2016年到期，但根据该计划自身的特点，预测未来CSI的到期不会对美国光伏市场造成异动。

其次，对于太阳能等可再生能源而言，未来最大的亮点还是在于对于传统化石能源的替代，跟传统能源在经济性上都存在差异，这也在一定程度上决定着产业的发展速度。根据上述对美国光伏市场供给的分析，美国光伏系统基础成本逐年呈下降趋势，将推动产业的上行。

最后，除了政策支持和成本变动带来的影响之外，另一个影响产业的关键因素就是产业产能的扩张与收缩。经历了2011年产能扩张后，2013年呈恢复性增长状态，2014年美国光伏市场增长有所恢复，有望由下行底部周期向下一轮成长周期转换。

综合上述分析，短期内美国光伏市场在成本推动和需求拉动的合力作用下将呈上升态势。从长期来看，随着光伏发电平价上网的实现，光伏产业的驱动力将从依靠政府补贴的模式转向自发消费。而这种自我增长相比政策扶持更具可持续性，因此长期内看涨美国光伏市场。

从美国光伏市场的地域分布来看，美国光伏发展区域集中在加利福尼亚、新泽西、佛罗里达、亚利桑那、科罗拉多和新墨西哥等州，其中加利福尼亚州的新增光伏装机容量处于领先位置。随着政策带动下的光伏生产技术的进步和光伏设备的普及，美国光伏发电的平均安装价格出现了迅速下降，由1998年的每瓦10.8美元降至目前的每瓦不足6美元的水平，这将进一步推动光伏应用的扩展。

据预测，美国累计光伏装机容量将于2016年达到里程碑式的10GW，并于2020年达到15GW的水平。2020年，美国光伏发电成本将降至每千瓦时10美分以下。随着光伏发电成本的跌落，兆瓦级光伏发电站将在美国不断涌现，美国光伏发电应用水平将迈上更高的台阶。

1.1.2 欧洲光伏发展状况

进入21世纪以来，欧洲经济的高速发展使能源消耗也相应大幅增加。化石能源因其不可再生性及对环境的破坏性使欧洲各国将目光转向风能、太阳能等可再生清洁能源。在欧洲，风能比太阳能发展早，风力发电因技术成熟、可

靠性高、成本低且规模效益显著在欧洲大陆得到广泛应用。虽然光伏发电技术在欧洲大范围应用相对较晚，但增长迅速，现已成为欧洲最重要的可再生能源之一。

2004 年以来，无论是年度新增光伏装机容量还是累计光伏装机容量，欧洲一直是超越亚太地区、美洲地区、中东与非洲地区以及世界其他地区的世界第一大光伏发展区。尤其是 2008 年以来，欧洲年度新增光伏装机容量出现了飞速增长，由 2008 年的 5.297GW 和 2009 年的 5.803GW 猛增至 2010 年的 13.367GW 和 2011 年的 21.939GW。2011 年的水平达到仅次于其的亚太地区同年新增光伏装机容量的 8 倍多。同期欧洲累计光伏装机容量以惊人的速度由 2008 年的 10.554GW 和 2009 年的 16.357GW 迅速提升至 2010 年的 29.777GW 和 2011 年的 51.716GW。2011 年的水平是亚太地区同年累计光伏装机容量的近 7 倍，是全球总量的约 75%。目前，光伏电力已成为欧洲电力供应结构中的一个重要组成部分，满足着欧洲国家日常时期 2%和用电高峰期 4%的电力需求，并可预见其贡献率将进一步增大。

近几年，欧洲光伏发电发展迅猛，尤以意大利和德国的光伏产业发展最为显著，2011 年世界光伏市场近 60%的增长来自于意大利和德国。

2009 年 1 月，意大利政府将净电表政策推广运用到装机容量超过 200MW 的光伏系统上，这保证了光伏系统安装者享受到与其消费的公网电价价格相同的剩余电量卖价。此外，意大利政府还对输送剩余电力的主体实施补贴和减税政策，这在很大程度上直接推动了商用、民用及公用光伏系统的发展。

欧洲光伏行业协会发布的一份关于全球光伏市场未来展望的报告中一共采用了 3 种不同的预测模型，不同国家根据其光伏发电发展情况适用于不同模型。其中欧洲各国只有德国与英国两个国家适用于最有利于光伏发电发展的模式——转移模型。在这种模型下所有政策与技术障碍都被移除，并且预计截至 2020 年全欧洲 12%的电力供应来自于光伏发电。根据此模型预测，至 2020 年德国光伏发电年均装机量将达 5.9GW，光伏发电装机总量将可达 80GW。相比之下，德国政府根据国内自身光伏发电发展情况制定的可再生能源计划行动 2020 年目标相对偏低。根据此行动计划，2020 年德国光伏发电装机总量为 51.8GW。欧洲光伏行业协会根据德国目前光伏发电发展现状对这份计划进行了评估，认为德国光伏发电发展势头良好，预计在 2016—2020 年间德国将会实现该计划

目标。

德国的光伏发电发展在欧洲乃至全世界范围内起到了示范性的作用。德国光伏发电发展路线为：在光伏发电早期，整个光伏发电行业由政府主导，政府通过立法强制补贴等措施通过保障光伏发电从业者的利益并促进整个行业发展；之后随着技术的进步，光伏发电的成本逐年降低，政府通过对相关法案的修订将补贴逐年降低，使整个行业逐步实现市场化。

总体而言，欧洲光伏市场的增速放缓。2010 年欧洲累计装机量为 30GW，其中德国占 59%、西班牙 13%、意大利为 12%。2011 年欧洲光伏新增装机量与上网量预计达到 15～17GW；光伏累计安装量预计达到 45～47GW，其中德国（47%）、意大利（27%）、西班牙（9%）、法国（5%）、捷克共和国（4%）是主要市场。欧洲市场在 2015 年反弹后再次下滑。从 2014 年的 7GW 到 2015 年的约 8GW，2016 年下降到约 6GW。2016 年最大的欧洲市场是英国，约为 2GW，其次是德国（1，5GW），法国装机量下降（0.65GW）。未来 5 年时间内，欧洲光伏市场都不会有很大的改观，将呈现下降趋势。原因可以归结为：支持政策减少、公用事业设备增加遭到反对、经济危机下的财政危机的出现，这些原因使得欧洲市场将减少，至少在未来两年将出现停滞。

EPIA 研究发现，未来 10 年，欧洲国家光伏系统的价格可能会下降 36%～51%，对于所有的细分市场也是如此。截至 2020 年光伏发电成本可能会下降 50%，5 大欧洲电力市场（法国、德国、意大利、西班牙、英国）将于光伏发电形成激烈的竞争，如图 1-1 所示。

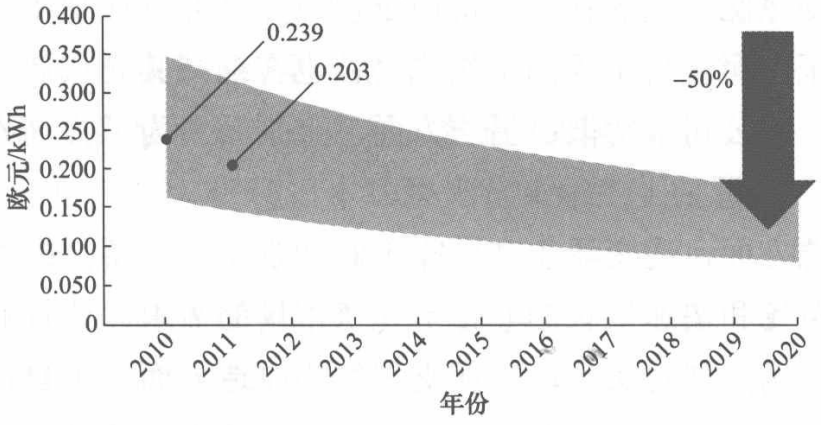


图 1-1　2010—2020 年欧洲光伏 LCOE（每度电成本计算说明）预测

1.1.3 日本光伏发展状况

2012 年，日本光伏发电年装机容量从 2011 年的 1.3GW 实现了大幅增长，达到 2GW。到 2012 年底，光伏发电累计装机量达到约 7GW。这一年日本光伏发电装机量的增加，主要归功于日本住宅光伏市场的稳步增长和由新的上网电价补贴政策支持的非住宅光伏系统安装的迅速增加。

在光伏电池和组件的制造、原材料、零部件以及设备制造方面，由于全球光伏电池和组件价格的不断下降，大量来自新兴国家的海外光伏制造商利用其低价产品进入日本市场，再加上日元的持续升值，日本的一些制造厂商被迫退出光伏行业，部分日本公司也被迫重组业务或重新审视自己的发展战略。

在这样一种恶化的营商环境中，包括夏普和京瓷在内的光伏产品制造商除了销售光伏组件和系统之外，也开始从事交钥匙工程总承包（EPC）和发电业务。松下等一些光伏企业开始在海外建立基地，生产光伏组件，而且还增加了原始设备制造商（OEM）采购。还有一些光伏企业推出了高附加值，如高输出容量、重量轻以及良好的设计等。其他企业则不断提高光伏组件的可靠性，包括电势诱导衰减（PID）等问题。海外光伏制造商纷纷进入日本光伏市场，主要是针对非住宅光伏系统应用，并加强了在该领域的业务活动。外国制造的光伏组件在日本的市场占有率约超过 30%。

在硅原料方面，许多日本公司决定退出光伏业务，包括 NS 太阳能材料公司，JFE 钢铁公司，三菱住友株式会社和空间能源公司等。其他公司正在进行业务重组，例如热磁公司的裁员，德山公司改变其业务计划等。在光伏组件方面，日本旭硝子公司与日本板硝子株式会社也在缩减其光伏业务。在设备制造方面，一方面一些公司被解散；另一方面，个别公司为了提高光伏业务，收购子公司。

在平衡系统方面，逆变器生产厂家不断加强生产设备，扩大产品阵容，以满足住宅光伏市场和快速增长的非住宅光伏市场的需求。该行业进入了大量的海外制造商，市场发展势头大增。在支架结构制造方面，来自钢铁行业、水泥行业和铝行业等的一系列新企业期待地面光伏系统市场的潜在增长，开始进入支架制造行业。

日本光伏利用行业一直非常活跃。在住宅建筑领域，每年超过 30 万间房屋

都安装了光伏发电系统。中小型房屋制造商开始扩大住宅光伏系统的安装，特别是农村地区也开始在房屋上安装光伏系统。太阳能光伏发电系统的发电量也随着安装数量的增加而增加。随着“智能住宅”这一概念的传播和扩展，新建住宅安装光伏系统已经逐步成为“智能住宅”的一项标准。在一些公寓，通过利用 FIT 计划已经安装了越来越多的中型光伏发电系统。

由于光伏市场从中型到兆瓦级光伏系统的整体增长，使得交钥匙工程总承包（EPC）和光伏系统集成业务不断增长。除了一直从事光伏行业的光伏制造商和公司（如重电机械行业，光伏系统安装和分销商）以外，包括电气设备公司、公用事业相关的公司、总承包商、通信公司、项目开发商和贸易公司等各种行业的公司也开始进入光伏市场。此外，还出现了与光伏相关的新型行业，如光伏发电站的运营和维护（O&M），来确保光伏系统的盈利能力，测量和监测发电量，以及进入发电业务的配套服务等。

金融机构开始为引进住宅光伏系统的个人客户以低利率提供贷款，并提供新的融资方案以支持光伏发电业务。一部分金融机构还开始建立兆瓦级光伏项目投资基金。

公用事业电力公司继续兑现他们主动引进光伏发电系统的承诺，积极推进光伏系统的安装应用。十家公用事业单位还宣布了一项计划，即到 2020 年，在全国建立总容量为 140MW 的 30 个光伏发电站。截至 2012 年底，大多数光伏发电站已完成，共有 73MW 的光伏发电站正在运行。此外，一些公用事业公司还通过在客户所拥有的房产屋顶上安装光伏发电系统。

日本福岛核灾难促使日本大力发展本国可再生能源，以提高对其能源结构的贡献。这也为光伏产业带来了巨大的机遇。然而在孵化巨大机遇的同时，日本光伏市场对于海外供应商而言也有很高的进入壁垒。

上网电价政策的实施，促使日本加快光伏系统的大规模推广。光伏市场的发展现状也随之发生大幅改变。2013 年，住宅光伏市场所占份额将大幅下降，逐步转向公共、工业和商业等非住宅光伏市场，结合主要的住宅光伏市场，这些市场将有助于创造协调发展的 GW 级光伏市场，2017 年 4 月起这些行业将增长迅速，为国外制造商创造更多的发展空间。

随着光伏系统安装量的增加，上网电价政策也将带来新的商机。鉴于商业和工业光伏市场的逐步扩大，日本光伏发电的产业结构也将不断扩大和加强。