

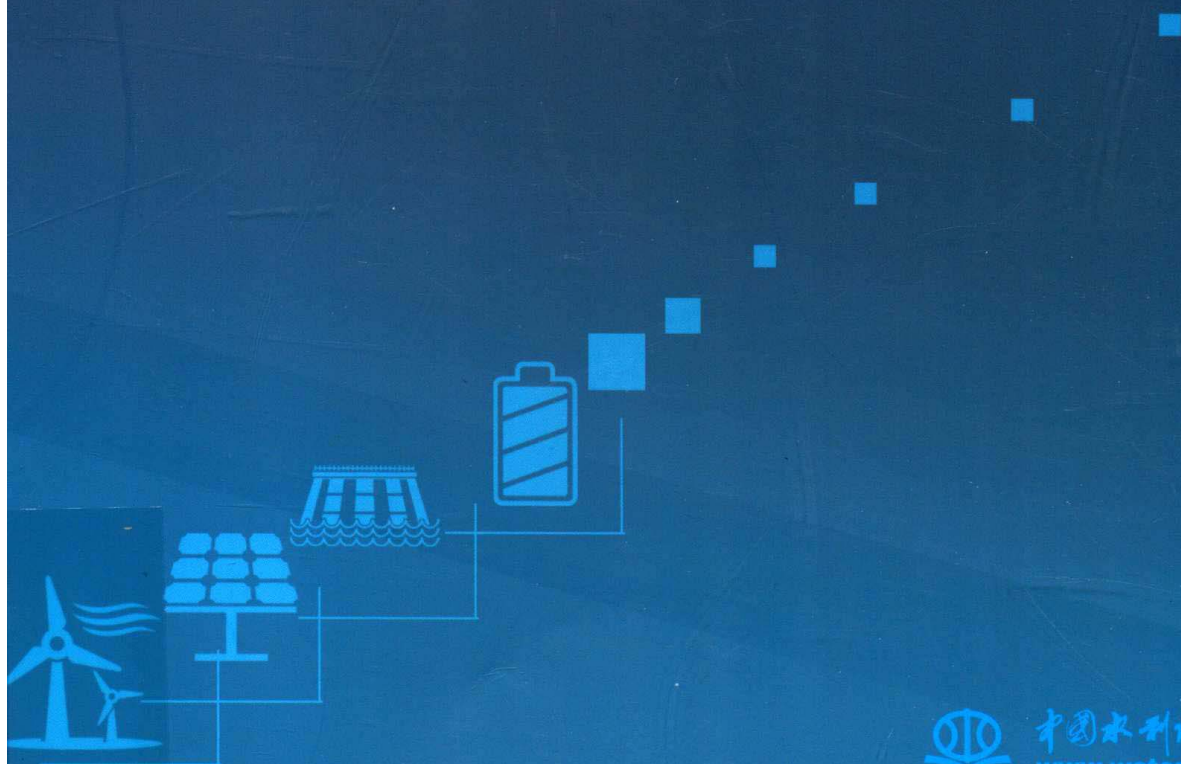


大规模清洁能源高效消纳关键技术丛书

清洁能源 网源协调规划技术

QINGJIE NENGYUAN
WANGYUAN XIETIAO GUIHUA JISHU

李生 张祥成 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

模清洁能源高效消纳关键技术丛书

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

清洁能源 网源协调规划技术

李生 张祥成 等 编著

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是《大规模清洁能源高效消纳关键技术丛书》之一，全面、系统地对国内外清洁能源的发展、我国清洁能源的分布及发展规划、各种清洁能源的发电特性、清洁能源消纳能力分析、清洁能源网源协调技术、清洁能源特高压直流外送技术、清洁能源汇集接入技术等方面进行了深入剖析，通过大量的工程案例和数据对清洁能源网源协调规划技术的特点和实际应用进行了分析，对提高清洁能源系统的调节能力，解决我国清洁能源消纳方面有积极的作用。

本书通俗简练、系统翔实、图文并茂，适合从事太阳能发电、风力发电以及电力系统规划、设计、调度、生产、运行等工作的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目（C I P）数据

清洁能源网源协调规划技术 / 李生等编著. — 北京：
中国水利水电出版社，2019.12
（大规模清洁能源高效消纳关键技术丛书）
ISBN 978-7-5170-8338-2

I. ①清… II. ①李… III. ①无污染能源—能源管理
IV. ①X382

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第106294号

书 名	大规模清洁能源高效消纳关键技术丛书 清洁能源网源协调规划技术 QINGJIE NENGYUAN WANGYUAN XIETIAO GUIHUA JISHU
作 者	李 生 张祥成 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 181千字
版 次	2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《大规模清洁能源高效消纳关键技术丛书》

编 委 会

主 任 沈 同 祁太元

副 主 任 李 生 郭顺宁 朱 昱 范 越 高 浦 梅生伟
周 武 康 健

委 员 王春学 李 莉 李红霞 张海宁 弓建荣 方保民
王星楠 李炳胜 杨森林 杨小库 俞海国 张节潭
王东方 朱 鸽 韩廷海 汪 涛 周群星 王国宁
邹佳芯 裴爱国

顾 问 卢 强 车军平

丛 书 主 编 李春来

《清洁能源网源协调规划技术》

编 委 会

主 编 李 生 张祥成

副 主 编 李红霞 鲁 刚 许德操 张海宁 娄素华

编 委 李志青 马 雪 田 旭 李 楠 刘 飞 张桂红

戚庆茹 刘庆彪 史 锐 闫晓卿 温生毅 傅 旭

刘斯伟 杨 帆 秦旭武 王 猛 白左霞 陶 昕

李富春 马龙飞 张 君 李 芳 王海亭 王晓晨

苟晓侃 刘 宁 张永胜 黄存强 元 博 冯君淑

金一川 孙静怡 魏 楠 徐沈智 省天骄 陈 雪

安 娟 郭京兆 靳宝宝 王文昌

参编单位 国网青海省电力公司

国网能源研究院有限公司

华中科技大学

国网经济技术研究院有限公司

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

国网青海省电力公司清洁能源发展研究院

Preface

序

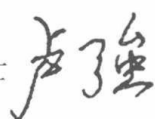
世界能源低碳化步伐进一步加快，清洁能源将成为人类利用能源的主力。党的十九大报告指出：要推进绿色发展和生态文明建设，壮大清洁能源产业，构建清洁低碳、安全高效的能源体系。清洁能源的开发利用有利于促进生态平衡，发展绿色产业链，实现产业结构优化，促进经济可持续性发展。这既是对我中华民族伟大先哲们提出的“天人合一”思想的继承和发展，也是党中央、习总书记提出的“构建人类命运共同体”中“命运”质量提升的重要环节。截至2019年年底，我国清洁能源发电装机容量9.3亿kW，清洁能源发电装机容量约占全部电力装机容量的46.4%；其发电量2.6万亿kW·h，占全部发电量的35.8%。由此可见，以清洁能源替代化石能源是完全可行的。

现今我国风电、太阳能等可再生能源装机容量稳居世界之首；在政策制定、项目建设、装备制造、多技术集成等方面亦具有丰富的经验。然而，在取得如此优势的条件下，也存在着消纳利用不充分、区域发展不均衡等问题。目前清洁能源消纳主要面临以下困难：一是资源 and 需求呈逆向分布，导致跨省区输电压力较大；二是风电、光伏发电的出力受自然条件影响，使之在并网运行后给电力系统的调度运行带来了较大挑战；三是弃风弃光弃小水电现象严重。因此，亟须提高科学技术水平，更加有效促进清洁能源消纳的质和量，形成全社会促进清洁能源消纳的合力，建立清洁能源消纳的长效机制，促进清洁能源高质量发展，为我国能源结构调整建言献策，有利于解决清洁能源产业面临的各种技术难题。

“十年磨一剑。”本丛书作者为实现绿色能源高效利用，提高光、风、水、热等多种能源综合利用效率，不懈努力编写了《大规模清洁能源高效消纳关键技术丛书》。本丛书从基础研究、成果转化、工程示范、标准引领和推广应用五个环节着手介绍了能源网协调规划、多能互补电站建模、测试以及快速调节技术、多能协同发电运行控制技术、储能运行控制技术和全国集散式绿色能源库规模化建设等方面内容。展现了大规模清洁能源高效消纳领域的前沿技术，代表了我国清洁能源技术领域的世界领先水平，亦填补了上述科技

工程领域的出版空白，望为响应党中央的能源转型战略号召起一名“排头兵”的作用。

这套丛书内容全面、知识新颖、语言精练、使用方便、适用性广，除介绍基本理论外，还特别通过实测建模、运行控制、测试评估等原创性科技内容对清洁能源上述关键问题的解决进行了详细论述。这里，我怀着愉悦的心情向读者推荐这套丛书，并相信该丛书可为从事清洁能源消纳工程技术研发、调度、生产、运行以及教学人员提供有价值的参考和有益的帮助。

中国科学院院士 

2019年9月3日

Foreword

前言

能源是经济社会发展的重要物质基础。进入 21 世纪，随着能源安全、生态环境、气候变化等问题日益突出，以清洁、低碳、智能为特征的新一轮能源革命在全球范围内蓬勃兴起，能源生产清洁化、消费电气化、配置全球化成为大势所趋。控制化石能源消费，促进清洁能源发展，成为很多国家能源转型的重要方向。

我国能源消费总量位居世界第一，能源结构长期以化石能源为主，带来资源紧张、环境污染等突出问题，严重影响人们的生产生活和经济社会的可持续发展，优化能源结构、推进能源转型已刻不容缓。党中央、国务院高度重视清洁能源发展，确定了 2020 年、2030 年非化石能源占一次能源消费比重达到 15%、20% 的目标，把发展清洁能源作为我国能源转型的主攻方向。

2014 年 6 月，中央财经领导小组第六次会议提出能源“四个革命、一个合作”的重要论述，为推动我国能源转型提供了战略框架和基本遵循。2015 年 9 月，联合国发展峰会提出，探讨构建全球能源互联网，推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求。2017 年 5 月，“一带一路”国际合作高峰论坛强调，抓住新一轮能源结构调整和能源技术变革趋势，建设全球能源互联网，实现绿色低碳发展。2017 年 10 月，党的十九大报告中指出，推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系。关于能源革命的一系列重要论述，为加快清洁能源发展、推动能源转型、实现能源可持续发展指明了前进方向。

国家电网有限公司认真贯彻能源发展重要指示，以实际行动贯彻落实国家能源战略，坚持把推动再电气化、构建能源互联网、以清洁和绿色方式满足电力需求作为基本使命，把服务新能源发展作为重要的政治任务，持续推进坚强智能电网建设，着力打造广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控、开放共享的新一代电力系统，多措并举、综合施策、千方百计推动我国清洁能源快速健康发展。截至 2017 年年底，国家电网有限公司清洁能源并网容量达到 5.1 亿 kW，其中水电、风电、太阳能发电的总装机容量分别为 2.2 亿

kW、1.5 亿 kW、1.2 亿 kW，均位居世界第一。

在取得成绩的同时也要看到我国清洁能源消纳还存在很多问题，清洁能源消纳利用是一个涉及电源、电网以及用电负荷的系统性问题。目前我国清洁能源消纳主要面临以下困难：一是资源和需求逆向分布，风光资源大部分分布在“三北”地区，水能资源主要集中在西南地区，而用电负荷主要位于中东部和南方地区，由此带来的跨省区输电压力较大；二是清洁能源高速发展与近年来用电增速不匹配，近年来在国家政策的积极支持下，清洁能源特别是风电、光伏发电的装机容量整体保持较快的增长速度，远超全社会用电量的增速，供需不匹配问题造成了较大的消纳压力；三是风电、光伏发电的出力受自然条件影响，存在较大的波动性，大规模并网后，给电力系统的调度运行带来了较大挑战。

《清洁能源网源协调规划技术》就是为适应清洁能源快速发展带来的难题，从规划层面提出系统的解决方案，促进网源协调发展。全书分 5 章，其中：第 1 章介绍清洁能源发展现状；第 2 章介绍清洁能源发电特性；第 3 章进行清洁能源消纳能力分析；第 4 章介绍清洁能源汇集并网技术；第 5 章介绍清洁能源网源协调规划技术，结合具体工程实践案例，给出清洁能源快速发展系统解决方案。

本书在编制过程中，得到了国网青海省电力公司、青海省能源局、国网能源研究院有限公司、国网经济技术研究院有限公司及有关高校等单位的大力支持。清洁能源是一个发展中的课题，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，诚望各界专家和广大读者提出宝贵意见和建议。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。

作者

2019 年 10 月

序

前言

第 1 章 清洁能源发展现状	1
1.1 世界清洁能源发展现状	1
1.2 我国清洁能源发展现状	7
第 2 章 清洁能源发电特性	14
2.1 清洁能源发电出力建模	14
2.2 清洁能源发电特性指标体系	26
2.3 案例分析	30
第 3 章 清洁能源消纳能力分析	53
3.1 我国清洁能源消纳现状及存在的问题	53
3.2 清洁能源消纳能力分析	56
第 4 章 清洁能源汇集并网技术	69
4.1 风电/光伏发电功率汇集技术	69
4.2 清洁能源并网布局优化技术	92
第 5 章 清洁能源网源协调规划技术	112
5.1 清洁能源网源协调规划数学模型	112
5.2 清洁能源网源协调规划流程	117
5.3 案例分析	118
参考文献	126

清洁能源发展现状

1.1 世界清洁能源发展现状

1.1.1 世界水电发展现状

近年来，世界水电的装机容量稳步增长，截至 2018 年年底，世界水电装机容量达到 12.46 亿 kW，同比增长 1.9%，增速比 2017 年上升 0.2 个百分点。2018 年世界水电新增装机容量约 2.32 亿 kW，同比增长 14.6%。2009—2018 年世界水电装机容量如图 1-1 所示。

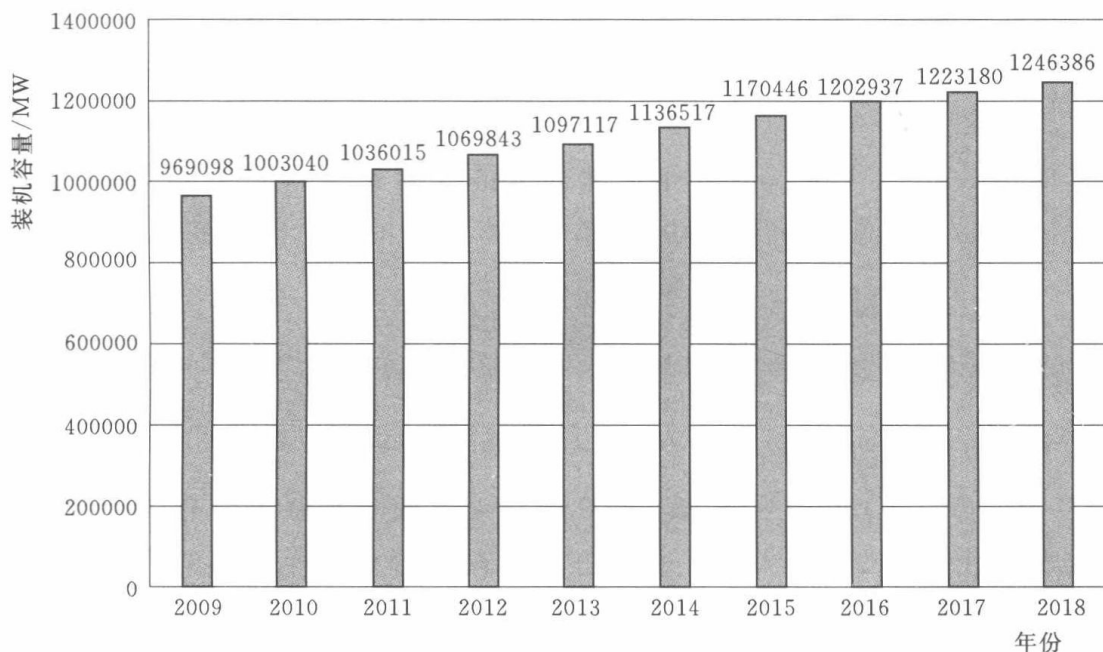


图 1-1 2009—2018 年世界水电装机容量

截至 2018 年年底，世界水电装机容量最多的国家依次为中国、美国、巴西、加拿大、俄罗斯，装机容量分别为 352260MW、101271MW、101069MW、80032MW、51499MW，合计占世界水电总装机容量的 55.1%。水电累计装机容量排名前十位的

国家如图 1-2 所示。

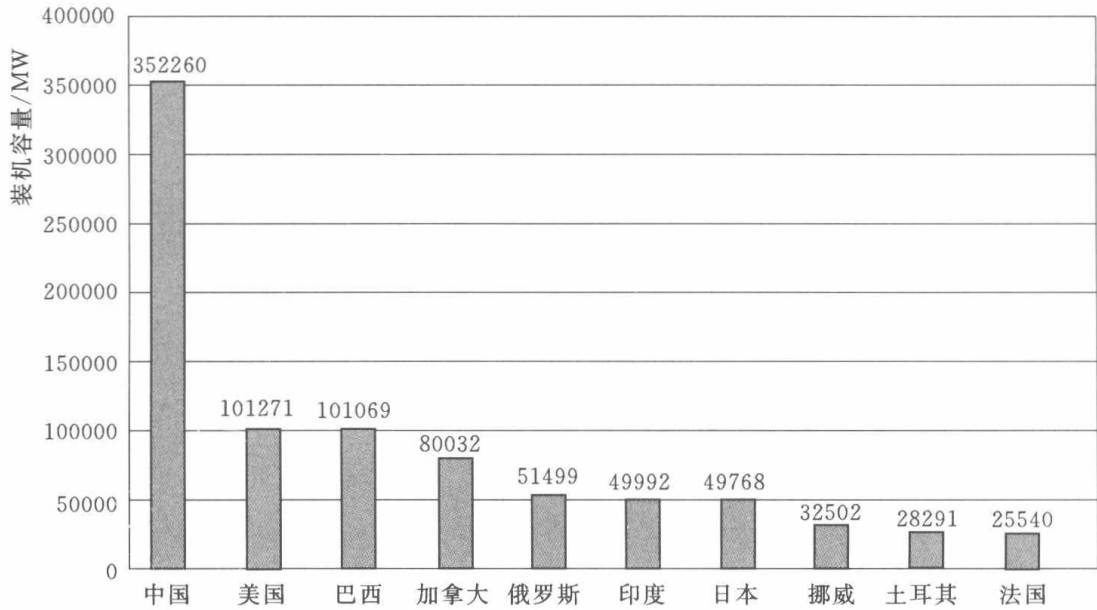


图 1-2 2018 年世界水电累计装机容量排名前十位的国家

2018 年新增水电装机容量最多的国家依次为中国、土耳其、巴西、越南、挪威等，新增装机容量分别为 8480MW、1018MW、668MW、583MW、528MW 等，中国新增水电装机容量居世界第一，约占世界水电新增装机容量的 47.8%。

抽水蓄能的发展与整体水电发展趋势相同，呈稳步增长趋势，但近年来增速有所放缓。截至 2018 年年底，抽水蓄能的累计装机容量为 157320MW，约占世界水电总装机容量的 12.6%；2018 年新增抽水蓄能的装机容量约 1967MW，约占世界水电新增装机容量的 8.48%。2009—2018 年世界抽水蓄能的装机容量如图 1-3 所示。

1.1.2 世界太阳能发电发展现状

1.1.2.1 世界光伏发电发展现状

自 20 世纪 50 年代美国贝尔实验室 3 位科学家成功研制出单晶硅电池以来，光伏电池技术经过不断改进与发展，目前已经形成一套完整而成熟的技术。随着世界可持续发展战略的实施，该技术得到了许多国家的大力支持，在世界范围内广泛使用。

根据国际可再生能源机构 (IRENA) 最新数据，2018 年世界新增并网光伏发电装机容量 94.3GW，2018 年世界所有可再生能源发电新增装机容量 171GW，太阳能发电新增装机容量占可再生能源装机容量的一半以上，光伏发电累计装机容量占全球可再生能源的 1/3 左右。光伏发电装机容量从 2013 年的 135.76GW，逐步增长到 2017 年的

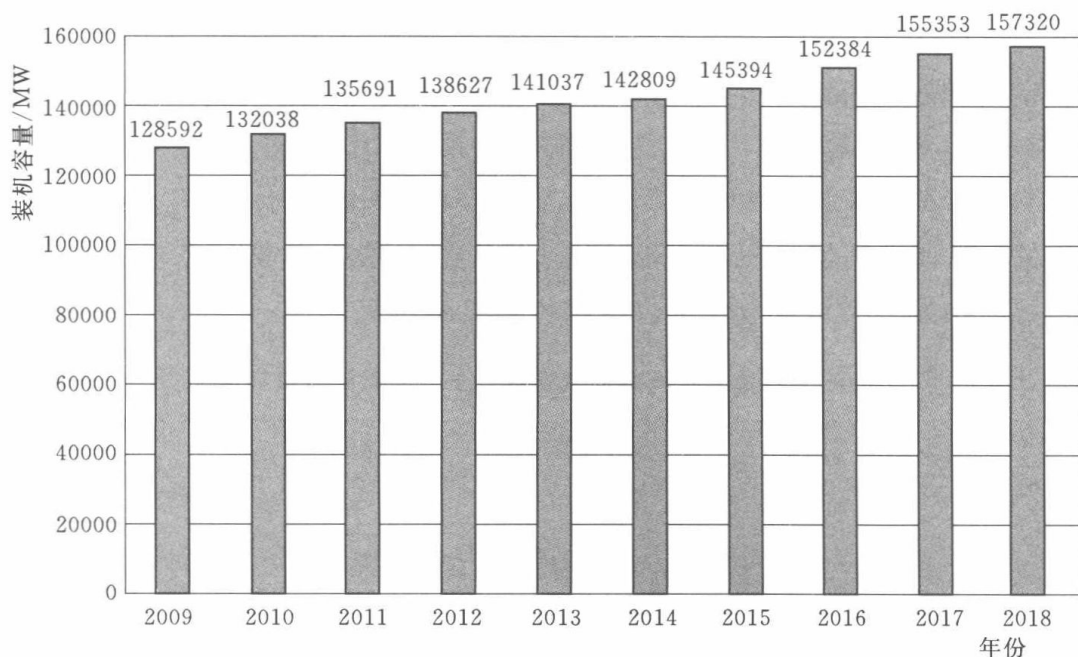


图 1-3 2009—2018 年世界抽水蓄能发电装机容量

386.11GW，再飞跃到 2018 年的 480.36GW；短短 5 年时间，实现了 3.5 倍的增长，增速惊人。2010—2018 年世界光伏发电新增及累计装机容量如图 1-4 所示^[1]。

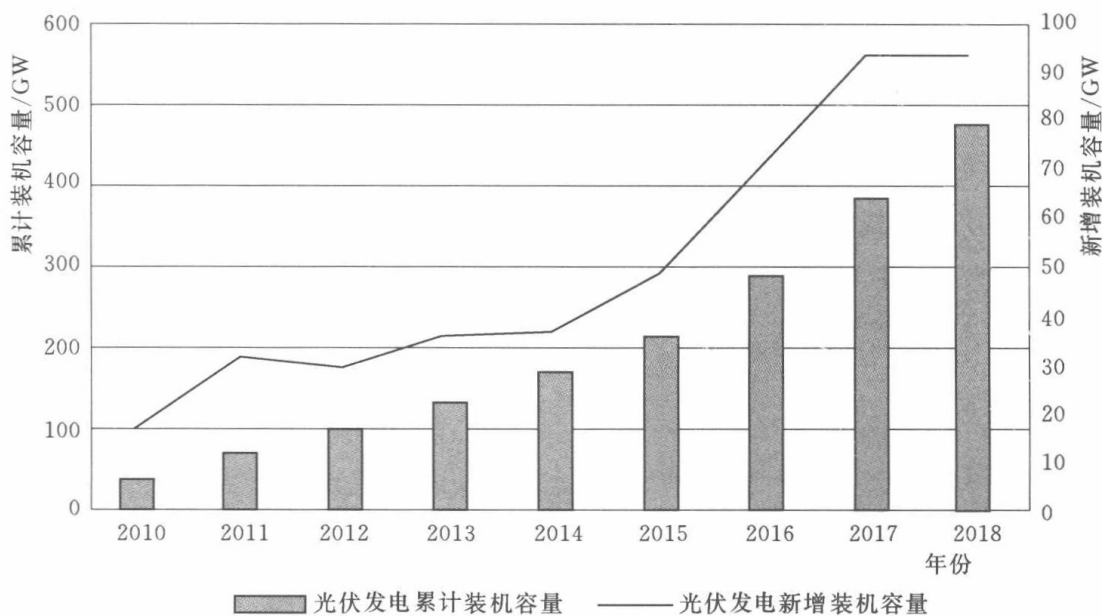


图 1-4 2010—2018 年世界光伏发电新增及累计装机容量

2018 年，亚洲地区以 64.1GW 的并网新增光伏发电装机容量独占鳌头，光伏发电累计装机容量从 2017 年的 210.8GW 增长到 2018 年的 274.9GW，成为世界光伏行业发展的明显推动力。其中，中国光伏发电累计装机容量 174.6GW，日本 55.5GW，

印度 27.1GW，韩国 7.9GW，巴基斯坦 1.5GW。上述五个国家的光伏发电累计装机容量达到 269.7GW，约占亚洲整体光伏发电装机容量的 98.1%，助力亚洲成为各大洲中发展最强的地区。

IRENA 公布的数据显示，2018 年新增光伏发电装机容量前十位的国家分别是中国、印度、美国、日本、澳大利亚、德国、墨西哥、韩国、土耳其、荷兰，中国更是以 45GW 的光伏发电新增装机容量和 174.6GW 的光伏发电累计装机容量遥遥领先。2018 年世界光伏发电装机容量前十位国家的装机容量见表 1-1。

表 1-1 2018 年世界光伏发电装机容量前十位国家的装机容量 单位：GW

排名	国家	新增装机容量	国家	累计装机容量
1	中国	45.0	中国	174.6
2	印度	10.8	美国	62.2
3	美国	10.6	日本	56.0
4	日本	6.5	德国	45.4
5	澳大利亚	3.8	印度	32.9
6	德国	3.0	意大利	20.1
7	墨西哥	2.7	英国	13.0
8	韩国	2.0	澳大利亚	11.3
9	土耳其	1.6	法国	9.0
10	荷兰	1.3	韩国	7.9

1.1.2.2 世界光热发电发展现状

世界光热发电装机容量稳步增长。截至 2018 年年底，世界光热发电装机容量约 547 万 kW，同比增长 10.4%，2009—2018 年世界光热发电装机容量如图 1-5 所示。

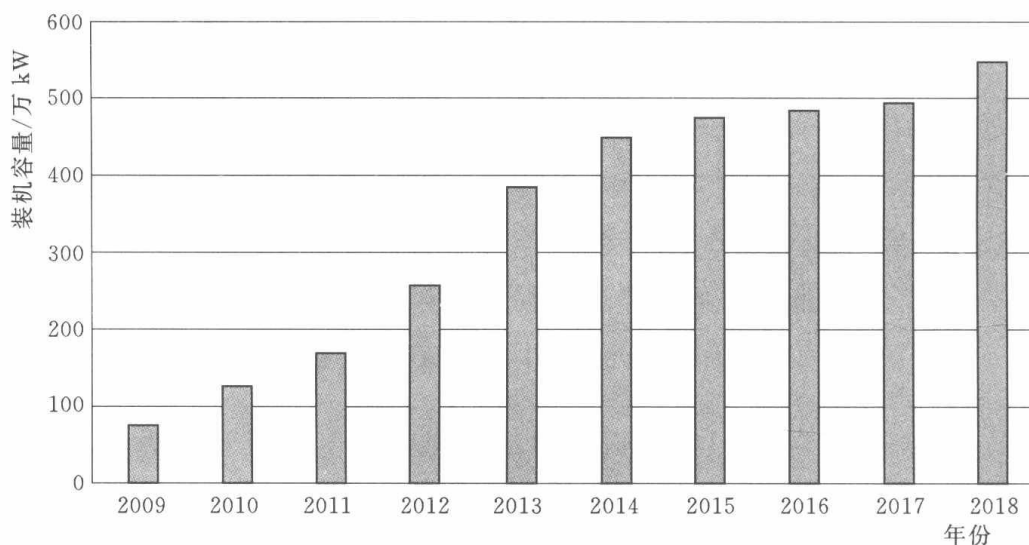


图 1-5 2009—2018 年世界光热发电装机容量

1.1.3 世界风电发展现状

世界风电装机增速放缓。截至2018年年底，世界风电装机容量达到5.64亿kW，同比增长9.5%，增速比2017年下降0.7个百分点。2018年世界风电新增装机容量约4910万kW，同比增长3.2%。2009—2018年世界风电装机容量如图1-6所示。

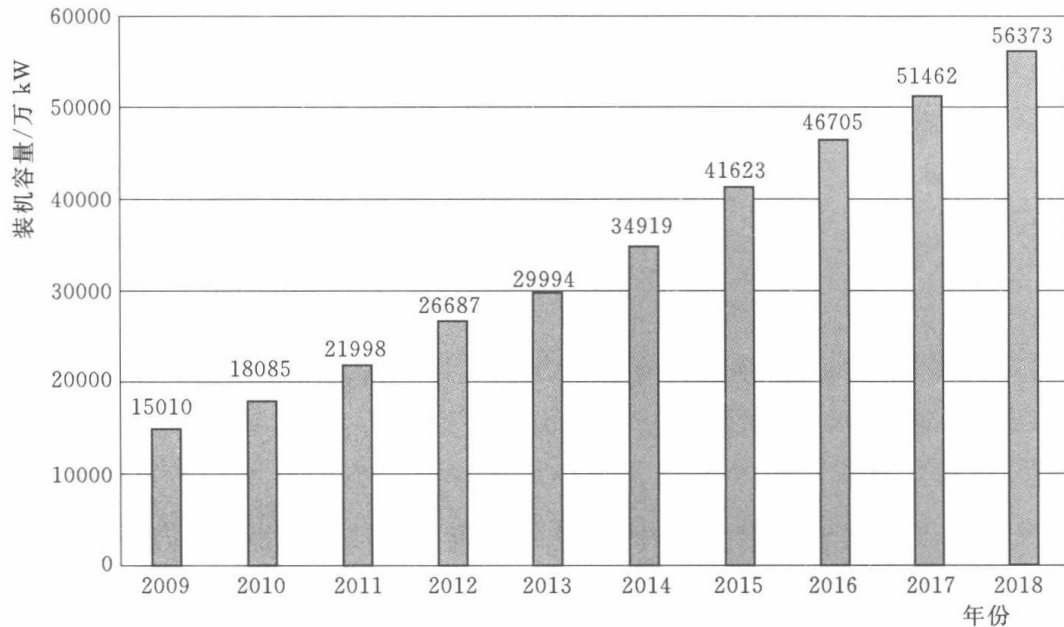


图 1-6 2009—2018 年世界风电装机容量

2018年，从世界风电装机容量的总体分布情况看，亚洲、欧洲和北美洲仍然是世界风电装机容量最大的三个地区，风电累计装机容量分别达到22903万kW、18249万kW和11199万kW，分别占世界风电累计装机容量的41%、34%和20%，如图1-7所示。

中国、美国、德国、印度、西班牙位列世界风电装机容量前五名。截至2018年年底，世界风电装机容量最多的国家中由多到少依次为中国、美国、德国、印度和西班牙，装机容量分别为18426万kW、9430万kW、5942万kW、3529万kW、2344万kW，合计占世界风电总装机容量的70.4%。2018年风电累计装机容量排名前十位的国家如图1-8所示。

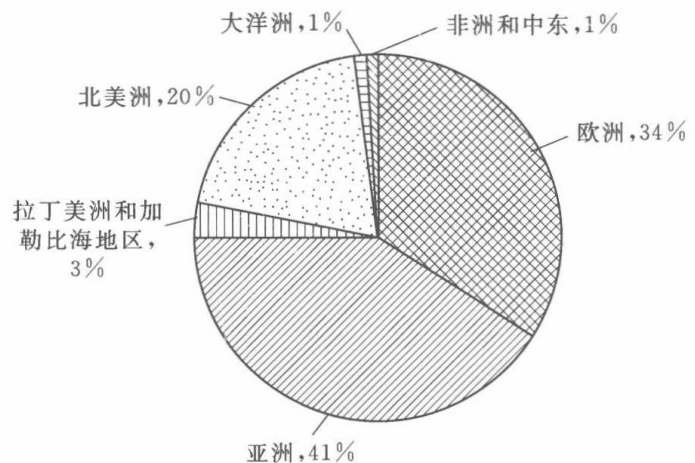


图 1-7 2018 年世界风电累计装机容量分布情况

2018年风电新增装机容量最多的国家中由多到少依次为中国、德

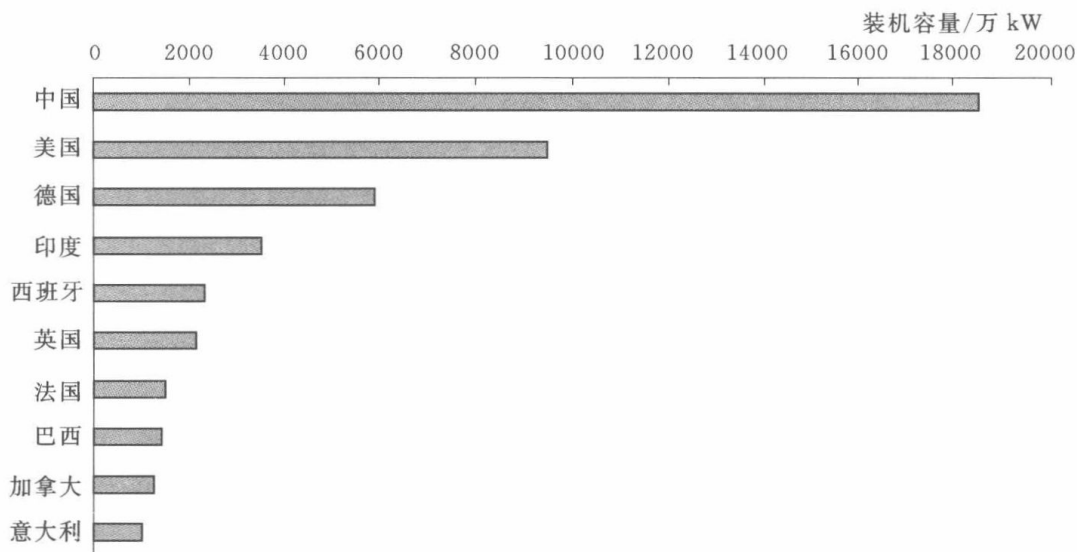


图 1-8 2018 年风电累计装机容量排名前十位的国家

国、美国、英国、印度，新增装机容量分别为 2101 万 kW、628 万 kW、626 万 kW、427 万 kW、418 万 kW，中国风电新增装机容量居世界第一，约占世界风电新增装机容量的 32.3%。

海上风电发展呈现地域较为集中的特点。截至 2018 年年底，海上风电累计装机容量 2336 万 kW，约占世界风电总装机容量的 4.1%；2018 年海上风电新增装机容量约 447 万 kW，约占世界风电新增装机容量的 9.09%。目前接近 80% 的海上风电位于欧洲，其他的示范项目位于中国、越南、日本、韩国和美国。截至 2018 年年底，欧洲海上风电累计装机容量 1852 万 kW，其中海上风电装机容量排名前三位的国家依次为英国（830 万 kW）、德国（641 万 kW）、中国（460 万 kW）；2018 年欧洲海上风电新增装机容量 267 万 kW，其中 49% 集中在英国（131 万 kW），36.3% 集中在德国（96.9 万 kW）。2009—2018 年世界海上风电装机容量如图 1-9 所示。

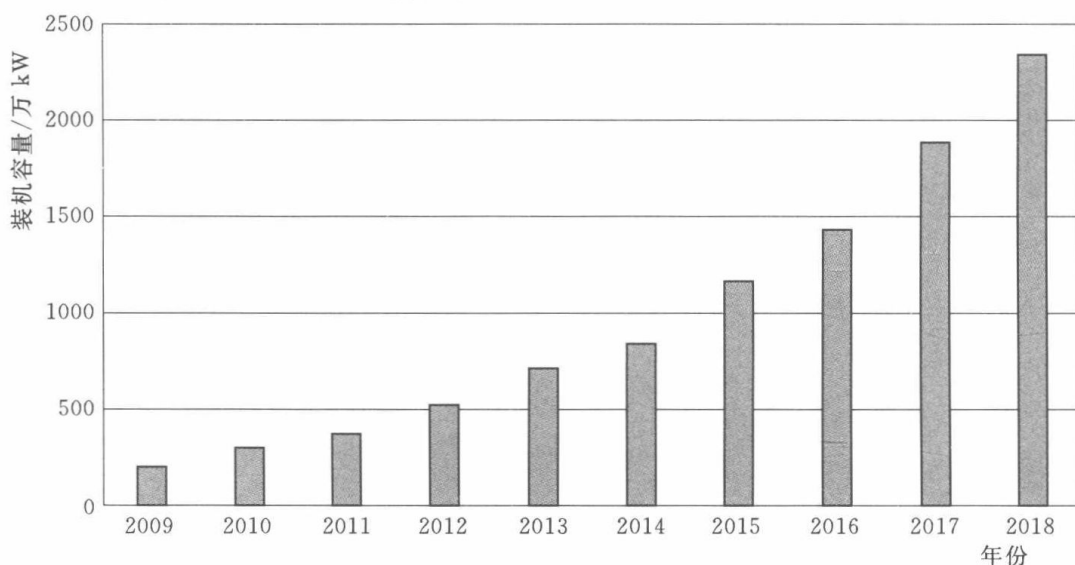


图 1-9 2009—2018 年世界海上风电装机容量

1.2 我国清洁能源发展现状

2018年中国清洁能源（包括非化石能源和天然气）占一次能源消费总量比重合计约为22.2%，较2012年提高了7.7个百分点，但距离2030年达到35%左右的目标还有一定差距。

中国的能源行业体量巨大，在转型过程中遇到了应对全球气候变化和生态保护方面的挑战、能源转型的适用技术和成本方面的挑战、能源结构与供给消费分布不均匀的挑战等。

针对上述挑战，中国有以下能源转型对策：

(1) 持续推动能源消费结构调整，进一步提高清洁能源占比。持续优化能源消费结构，加快清洁低碳转型，并积极推进煤炭清洁高效开发利用。

(2) 通过科技创新降低清洁能源的供给成本。近年来可再生能源规模化快速发展，成本不断下降，资源优良、建设成本低、投资和市场条件好的地区已初步具备对化石能源的成本优势，风电、光伏发电的成本已接近火电，为未来发展提供了有益经验。未来还需要促进可再生能源成本继续快速下降，提高市场竞争力。

(3) 清洁能源开发坚持分布式与集中式并举。未来中国中东部和南方等电力负荷中心地区将大力发展分散式风电、分布式光伏发电，因地制宜发展生物质能、地热能、氢能等，提高以清洁能源为主的分布式能源系统的应用比重，使能源就地供给、就近消纳。

中国将继续壮大清洁能源产业发展，全面建成清洁低碳、安全高效的能源体系，实现能源转型的战略目标。

1.2.1 国内水电发展现状

中国水电开发比国外起步晚，第一座水电站——石龙坝水电站，位于云南省昆明市郊，于1910年7月开工，1912年4月投入使用。从水电开发起步到1950年，中国水电一直处于缓慢开发状态，直到1950年以后水电开发有了较大的发展。我国首座百万千瓦级大型水电站——刘家峡水电站，于1958年9月开工建设，1974年12月全部建成，是当时全国最大的水利电力枢纽工程，曾被誉为“黄河明珠”。之后又修建了龙羊峡水电站，是黄河上游第一座大型梯级电站。1971年5月葛洲坝水电站开工兴建，于1988年12月全部竣工，是长江干流上的第一座大型水电工程。1994年开工建设的三峡水利枢纽，装机容量2250万kW，2009年全部完工，到目前为止是世界上最大的水电站。

中国常规能源剩余可采总储量的构成为：原煤61.6%、水力35.4%、原油