

应用型高校产教融合系列教材

大电类专业系列

新能源与可持续发展概论

张 菁 蔡光宗 ◎ 主编

王宇卫 朱宏声 田 羽 王国良 臧甲杰 ◎ 副主编



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书共有 12 章内容,系统地介绍了太阳能、风能、生物质能等新能源的概念与新能源技术,并对国内外新能源近些年的发展、应用与相关政策进行了系统的阐述,对可持续发展的内涵和要求,人口、资源、环境、经济、社会、科技与可持续发展的关系,实现可持续发展的途径和意义以及新能源与可持续发展的现状和未来展望进行了深入的论述。本书可作为高等院校新能源科学与工程本科专业的教材或参考书,也可作为高等院校相关专业通识选修课教材,还可供有意进军能源领域的人士和关注环境问题的人士参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

新能源与可持续发展概论 / 张菁, 蔡光宗主编. -- 北京: 清华大学出版社, 2026. 8.
(应用型高校产教融合系列教材). -- ISBN 978-7-302-72265-6

I. TK01

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20260F3D67 号

责任编辑: 王 欣

封面设计: 何凤霞

责任校对: 王淑云

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市天利华印刷装订有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 22.75

字 数: 551 千字

版 次: 2026 年 8 月第 1 版

印 次: 2026 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 86.00 元

产品编号: 105870-01



应用型高校产教融合系列教材

总 编 委 会

主 任：李 江

副 主 任：夏春明

秘 书 长：饶品华

学校委员（按姓氏笔画排序）：

王 迪 王国强 王金果 方 宇 刘志钢 李媛媛

何法江 辛斌杰 陈 浩 金晓怡 胡 斌 顾 艺

高 瞩

企业委员（按姓氏笔画排序）：

马文臣 勾 天 冯建光 刘 郴 李长乐 张 鑫

张红兵 张凌翔 范海翔 尚存良 姜小峰 洪立春

高艳辉 黄 敏 普丽娜



应用型高校产教融合系列教材·大电类专业系列

编 委 会

主 任：王成涛 李媛媛

副主任：（校 方） 王晓军

（企业方） 张红兵 张荣琪 张 新 蔡光宗 范立成

学校委员（按姓氏笔画排序）：

万卫兵 张 菁 罗光圣 栾新源 黄 容 滕旭东

企业委员（按姓氏笔画排序）：

王宇卫 田 羽 朱宏声 杨红军 吴达勇 赵大文

黄奇志 糜丹华

教材是知识传播的主要载体、教学的根本依据、人才培养的重要基石。《国务院办公厅关于深化产教融合的若干意见》明确提出,要深化“引企入教”改革,支持引导企业深度参与职业学校、高等学校教育教学改革,多种方式参与学校专业规划、教材开发、教学设计、课程设置、实习实训,促进企业需求融入人才培养环节。随着科技的飞速发展和产业结构的不断升级,高等教育与产业界的紧密结合已成为培养创新型人才、推动社会进步的重要途径。产教融合不仅是教育与产业协同发展的必然趋势,更是提高教育质量、促进学生就业、服务经济社会发展的有效手段。

上海工程技术大学是教育部“卓越工程师教育培养计划”首批试点高校、全国地方高校新工科建设牵头单位、上海市“高水平地方应用型高校”试点建设单位,具有 40 多年的产学合作教育经验。学校坚持依托现代产业办学、服务经济社会发展的办学宗旨,以现代产业发展需求为导向,学科群、专业群对接产业链和技术链,以产学研战略联盟为平台,与行业、企业共同构建了协同办学、协同育人、协同创新的“三协同”模式。

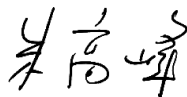
在实施“卓越工程师教育培养计划”期间,学校自 2010 年开始陆续出版了一系列卓越工程师教育培养计划配套教材,为培养具备卓越能力的工程师作出了贡献。时隔 10 多年,为贯彻国家有关战略要求,落实《国务院办公厅关于深化产教融合的若干意见》,结合《现代产业学院建设指南(试行)》《上海工程技术大学合作教育新方案实施意见》文件精神,进一步编写了这套强调科学性、先进性、原创性、适用性的高质量应用型高校产教融合系列教材,深入推动产教融合实践与探索,加强校企合作,引导行业企业深度参与教材编写,提升人才培养的适应性,旨在培养学生的创新思维和实践能力,为学生提供更加贴近实际、更具前瞻性的学习材料,使他们在 学习过程中能够更好地适应未来职业发展的需要。

在教材编写过程中,始终坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,全面贯彻党的教育方针,落实立德树人根本任务,质量为先,立足于合作教育的传承与创新,突出产教融合、校企合作特色,校企二元开发,注重理论与实践、案例等相结合,以真实生产项目、典型工作任务、案例等为载体,构建项目化、任务式、模块化、基于实际生产工作过程的教材体系,力求通过与企业的紧密合作,紧跟产业发展趋势和行业人才需求,将行业、产业、企业发展的新技术、新工艺、新规范纳入教材,使教材既具有理论深度,能够反映未来技术发展,又具有实践指导意义,使学生能够在 学习过程中与行业需求保持同步。

系列教材注重培养学生的创新能力和实践能力。通过设置丰富的实践案例和实验项目,引导学生将所学知识应用于实际问题的解决中。相信通过这样的学习方式,学生将更加

具备竞争力,成为推动经济社会发展的有生力量。

本套应用型高校产教融合系列教材的出版,既是学校教育教学改革成果的集中展示,也是对未来产教融合教育发展的积极探索。教材的特色和价值不仅体现在内容的全面性和前沿性上,更体现在其对于产教融合教育模式的深入探索和实践上。期待系列教材能够为高等教育改革和创新人才培养贡献力量,为广大学生和教育工作者提供一个全新的教学平台,共同推动产教融合教育的发展和创新,更好地赋能新质生产力发展。



中国工程院院士、中国工程院原常务副院长

2024年5月

前言

PREFACE

能源是人类社会和经济发展的物质基础,其消费水平也是各国社会经济发展水平的重要标志。21 世纪人类使用能源的方向在于实现能源结构转型,即由化石能源体系转向清洁低碳的新能源体系。方向已定,目标已明,关键是如何加快推进能源结构的转型。为此,许多国家围绕推进新能源发展制定了国家战略,而要落实战略目标,迫切需要培养大批专业人才,尤其是高级工程科技人才。

毫无疑问,培养新能源专业人才是新能源高等教育工作者的责任。未来让新能源更好地服务于人类可持续发展的目标,则更多的是新能源相关专业一批批青年学子的责任。为了引导学生进入充满魅力和挑战的新能源世界并爱上新能源,我们组织专家对本教材的架构进行了深入思考和广泛讨论,并形成了以下知识架构:

本书以制约可持续发展的资源和环境问题为主线,以新能源的召唤、人与自然的和谐为核心,重点阐述新能源、环境与可持续发展的关系。同时,融入环境污染、新能源的开发及综合应用的典型案例,以此分析新能源的开发和应用对资源、环境及可持续发展带来的机遇与挑战。本书兼顾基本性、多元性、整合性、趣味性,力争妥善处理能源领域通识教育与专业教育中存在的“通”与“专”的问题,有意识地打破专业壁垒,开阔学生视野,培养其文化通感和科学精神。

第一,围绕能源与环境这两个关系人类可持续发展的重大主题,描述新能源发展的宏大时代背景和世界能源消耗趋势,使学生了解新能源快速发展背后的逻辑,这是第 1 章的主题。

第二,全面介绍各种新能源技术,重点介绍太阳能、风能、生物质能等新能源技术,使学生形成对新能源技术的整体认知,以避免进入专业学习阶段后产生“只见树木、不见森林”的问题,这是第 2~5 章的主要任务。

第三,系统介绍新能源技术的应用,主要介绍在新能源汽车方面的技术现状和未来发展趋势。这是第 6 章的主要内容。

第四,整体分析资源利用与环境问题的产生,进而引出可持续发展的理念,介绍了其内涵、历史沿革及基本理论;接着阐述了人口、资源、环境、经济、社会、科技与可持续发展的关系,分析了新能源的开发和应用对各种资源及可持续发展带来的机遇与挑战,主要明确了资源、环境与可持续发展的辩证关系和实现可持续发展的路径。这是第 7~11 章要实现的目标。

第五,主要明确新能源与可持续发展的现状和未来发展趋势。首先探讨了环境污染、资

源约束和可持续发展的关系；接着介绍了世界主要国家新能源产业政策的研究进展，进而阐述了各国新能源战略的演进与中国新能源战略的选择；最后分析了全球能源互联网如何推动能源社会的可持续发展，阐明了构建全球能源互联网的重大意义。这是第 12 章的主要内容。

本书具备以下特点：

第一，本书是产教融合系列教材。产教融合能从根本上解决人才培养与社会需求脱节的问题，而产教融合教材是这场教育改革、转型发展的重要载体。本书应用特征明确，校企双元协同开发，能推动学生的应用能力培养。本书内容体现产业需求或工程实际，具有显著应用型特征。

第二，具有时代性、先进性、创新性，能为培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才和卓越工程师打下良好的专业基础。

第三，特色鲜明，实用性强，方便读者自学。相关章节中安排有新能源技术的相关实例，方便学生自学，将每个知识点紧密结合到相关学科，可以提高学生学习兴趣，方便不同基础的学生自学。

第四，重点突出，简明清晰，结论表述准确。对新能源和可持续发展的理论阐述清楚，结论准确，有利于培养学生的思维能力和解决实际工程问题的能力。

第五，难易适中，适用面广，符合因材施教的要求。本书适合不同的读者学习和参考使用，也适合普通高校教学之用。

第六，系统性强，强化应用，培养学生的动手能力。在本书的编写过程中，在确保新能源知识系统性的基础上，调研并参考了相关行业专家的意见。本书特别适用于卓越工程师培养以及创新型、实用型人才培养，相关工程技术人员在解决实际问题时也可参考使用。

鉴于首次编写这样一本教材，加之新能源专业方向的多样性及其所涉及学科的广泛性，同时囿于作者知识、能力和视野的局限性，教材的整体内容和呈现方式与所设定的目标还有差距，但考虑到国内新能源高等教育发展到今天，迫切需求新能源相关专业导论教材，所以我们决定先将其付梓，尽早补上这一空缺。真诚期望各所院校在使用过程中能不断提出宝贵意见，以便再版时更新和完善。

本书由上海工程技术大学电子电气工程学院张菁和上海电力设计院有限公司党委书记、董事长蔡光宗担任主编，上海电力设计院有限公司的王宇卫、朱宏声、田羽和上海工程技术大学的王国良、臧甲杰担任副主编。在本书的编写过程中，作者总结和吸收了新能源领域前辈的研究成果和有益经验，力求重点突出、理论结合实际，还得到了上海电力设计院有限公司的大力支持，在此一并表示衷心感谢！

编 者

2025 年 12 月

目 录

CONTENTS

第1章 绪论 / 1

- 1.1 能源可持续利用时代图景概览 / 1
 - 1.1.1 丹麦——新能源事业的先驱者 / 4
 - 1.1.2 日本——新能源事业的开拓者 / 5
 - 1.1.3 美国——新能源事业的领跑者 / 6
- 1.2 发展新能源的历史逻辑 / 6
 - 1.2.1 世界能源消耗趋势 / 7
 - 1.2.2 现阶段能源结构存在的诸多问题 / 8

第2章 新能源概述 / 12

- 2.1 三次能源革命 / 12
- 2.2 新能源的概念 / 15
- 2.3 新能源的分类 / 16
- 2.4 新能源的特点 / 19
- 2.5 储能 / 20
 - 2.5.1 储能方式 / 20
 - 2.5.2 储能技术的应用 / 22
- 2.6 新能源的发展趋势及展望 / 23
 - 2.6.1 新能源发展趋势 / 23
 - 2.6.2 新能源及其行业发展趋势展望 / 24

第3章 太阳能——新能源的领军者 / 28

- 3.1 太阳能的概念 / 29
- 3.2 太阳能的转换利用技术途径 / 30
 - 3.2.1 光热发电 / 30

- 3.2.2 光伏发电 / 31
- 3.3 我国的太阳能资源分布 / 31
- 3.4 太阳能光伏发电的优势和问题 / 33
- 3.5 光伏发电的原理与光伏并网体系架构 / 33
- 3.6 光伏并网逆变器拓扑介绍 / 37
 - 3.6.1 隔离型光伏并网逆变器 / 37
 - 3.6.2 非隔离型光伏并网逆变器 / 40
- 3.7 最大功率输出点跟踪控制原理 / 41
- 3.8 光伏发电的发展历程 / 43
 - 3.8.1 光伏发电的发展现状 / 43
 - 3.8.2 光伏发电的发展趋势 / 45
- 3.9 中国光伏产业发展现状：挑战与对策 / 47
 - 3.9.1 我国光伏产业现状 / 47
 - 3.9.2 对中国光伏产业链的分析 / 49
 - 3.9.3 中国光伏产业面临的主要问题与对策建议 / 57

第4章 风能及其利用 / 61

- 4.1 风能利用的历史和现状 / 61
- 4.2 风力发电系统的组成、原理及应用 / 63
- 4.3 风力发电系统的类型 / 65
 - 4.3.1 定速风力发电系统 / 65
 - 4.3.2 变速风力发电系统 / 65
 - 4.3.3 变速恒频风力发电机组 / 66
 - 4.3.4 风力发电能量转换原理 / 67
- 4.4 风力发电场的选址及运维 / 70
- 4.5 风力发电并网 / 71
- 4.6 风能资源 / 72
- 4.7 基于产业链与产业集群视角的中国风电产业发展研究 / 74
 - 4.7.1 中国风电产业链的构成 / 74
 - 4.7.2 中国风电产业链的发展历程 / 74
 - 4.7.3 中国风电产业链各环节的竞争格局 / 77
 - 4.7.4 风电产业链主要环节的国际对标 / 83
 - 4.7.5 中国风电产业链存在的问题 / 86
 - 4.7.6 中国风电产业链问题的成因 / 92
 - 4.7.7 中国海上风电发展现状及未来展望 / 97
 - 4.7.8 完善中国风电产业链的建议 / 102



第5章 生物质能 / 105

- 5.1 生物质能的概念及分类 / 105
- 5.2 生物质能的特点 / 106
- 5.3 生物质转化利用技术途径 / 107
 - 5.3.1 生物质热化学转化 / 107
 - 5.3.2 生物质生物化学转化 / 110
 - 5.3.3 生物质其他转化利用途径 / 116
 - 5.3.4 生物炼制 / 117
- 5.4 中国生物质能产业链发展现状及趋势 / 119
 - 5.4.1 生物质能产业发展趋势 / 119
 - 5.4.2 中国生物质能产业链建设现状 / 122
 - 5.4.3 中国生物质能产业链发展面临的挑战 / 127
 - 5.4.4 优化中国生物质能产业链的对策与建议 / 129

第6章 新能源技术的应用 / 131

- 6.1 新能源汽车 / 131
- 6.2 新能源汽车技术 / 132
 - 6.2.1 混合动力汽车 / 132
 - 6.2.2 天然气汽车 / 133
 - 6.2.3 纯电动汽车 / 134
 - 6.2.4 燃料电池汽车 / 147
- 6.3 新能源汽车的发展前景 / 152

第7章 资源利用与环境问题的产生 / 155

- 7.1 环境的基本概念 / 155
 - 7.1.1 环境的概念及其基本类型 / 155
 - 7.1.2 环境污染与环境问题 / 156
 - 7.1.3 全球性环境问题 / 158
- 7.2 气候危机 / 158
 - 7.2.1 概述 / 158
 - 7.2.2 气候危机的产生原因 / 161
 - 7.2.3 气候变化问题的兴起 / 162
 - 7.2.4 温室效应的影响 / 164
 - 7.2.5 温室效应的控制对策 / 168
- 7.3 臭氧层被破坏的原因、危害及防治措施 / 170

- 7.3.1 臭氧层及其作用 / 170
- 7.3.2 臭氧层空洞解析 / 171
- 7.3.3 臭氧层空洞的危害及对策 / 173
- 7.4 大气污染 / 178
 - 7.4.1 大气污染实录 / 179
 - 7.4.2 大气污染解析 / 198
 - 7.4.3 大气污染的危害 / 207

第8章 可持续发展概述 / 213

- 8.1 可持续发展的定义 / 213
- 8.2 可持续发展思想的产生 / 214
- 8.3 可持续发展的地学思考 / 215
- 8.4 可持续发展的基本理论 / 216
 - 8.4.1 可持续发展的形式 / 216
 - 8.4.2 可持续发展的主要内容 / 217
 - 8.4.3 可持续发展的基本原则 / 218
 - 8.4.4 实施可持续发展的要求 / 219
 - 8.4.5 可持续发展的要素 / 219
 - 8.4.6 可持续发展理论和经济学 / 220
- 8.5 可持续发展的案例 / 220
 - 8.5.1 德国 12 号矿区变身工业遗址公园 / 220
 - 8.5.2 其他案例解析 / 224

第9章 人口、资源、环境可持续发展研究 / 227

- 9.1 人口可持续发展 / 227
 - 9.1.1 人口内涵与人口观 / 227
 - 9.1.2 人口在可持续发展中的地位和作用 / 230
- 9.2 资源可持续发展 / 232
 - 9.2.1 资源物质观 / 232
 - 9.2.2 资源稀缺论 / 233
 - 9.2.3 人口压力观 / 234
 - 9.2.4 资源系统观 / 235
 - 9.2.5 资源经济观 / 236
 - 9.2.6 资源消费观 / 237
- 9.3 环境内涵与环境观 / 239
 - 9.3.1 环境保护意识萌创和环境科学兴盛 / 239
 - 9.3.2 环境统一观的具体内容及在现代社会中的应用 / 240



- 9.3.3 环境经济观 / 242
- 9.3.4 环境和谐观——现代“三圈”发展模式 / 244
- 9.3.5 环境协调观 / 247

第10章 经济、社会、科技可持续发展研究 / 249

- 10.1 经济可持续发展 / 249
 - 10.1.1 新的经济发展观 / 249
 - 10.1.2 可持续经济发展能力 / 250
 - 10.1.3 经济可持续发展战略目标及实现途径 / 252
 - 10.1.4 区际关系可持续发展 / 253
- 10.2 社会可持续发展 / 255
 - 10.2.1 社会可持续发展的内涵与社会观 / 255
 - 10.2.2 社会可持续发展的哲学基础 / 257
 - 10.2.3 社会可持续发展自然观 / 258
 - 10.2.4 可持续社会发展能力及其指标体系 / 268
- 10.3 科技可持续发展 / 272
 - 10.3.1 新技术革命与人类社会文明转型 / 272
 - 10.3.2 高科技产业化的背景与社会意义 / 277
 - 10.3.3 创新 / 287

第11章 人口、资源、环境、经济、社会、科技与可持续发展的关系 / 293

- 11.1 可持续发展的辩证关系 / 293
 - 11.1.1 可持续发展的内涵与基本模式 / 293
 - 11.1.2 可持续发展系统互动关系 / 294
- 11.2 可持续发展系统内部稀缺性 / 295
 - 11.2.1 人口、资源、环境的稀缺性及其合理配置 / 295
 - 11.2.2 人口、资源与环境经济学 / 296
 - 11.2.3 人类行为外部效应 / 297
- 11.3 从经济人到生态人 / 300
 - 11.3.1 经济效益变革为系统生态经济效益 / 300
 - 11.3.2 从恶性循环到良性循环 / 301

第12章 新能源与可持续发展现状及展望 / 302

- 12.1 环境污染、资源约束和可持续发展探讨 / 302
 - 12.1.1 气候变化在物理层面和制度层面都对各国形成碳约束 / 302
 - 12.1.2 应对碳约束的能力将成为重要的国际竞争力 / 303

- 12.1.3 发展新能源及其产业是应对碳约束的重要手段 / 304
- 12.1.4 新能源产业发展迎来重大机遇 / 305
- 12.2 关于中国新能源产业政策的研究进展 / 305
 - 12.2.1 产能调控视角：针对产能非理性扩张问题 / 306
 - 12.2.2 产业竞争力视角：针对创新能力等问题 / 307
 - 12.2.3 内需创造视角：针对能源—环境政策等问题 / 308
- 12.3 关于中国新能源战略的研究进展 / 310
 - 12.3.1 能源安全的视角 / 310
 - 12.3.2 环境安全的视角 / 311
- 12.4 主要国家新能源战略的演进与中国新能源战略的选择 / 312
 - 12.4.1 主要发达国家新能源战略的演进 / 313
 - 12.4.2 其他重要国家新能源发展战略与政策 / 318
 - 12.4.3 主要国家新能源战略的特点比较与启迪 / 321
 - 12.4.4 中国新能源战略定位与能源系统转型 / 323
- 12.5 全球能源互联网推动能源社会的可持续发展 / 325
 - 12.5.1 构建能源互联网的重大意义 / 326
 - 12.5.2 能源互联网的内涵与特征 / 327
 - 12.5.3 国内外能源互联网的发展现状 / 329
 - 12.5.4 中国能源互联网建设系统推进阶段面临的突破与挑战 / 332
 - 12.5.5 中国破解能源互联网困境的对策与建议 / 337

参考文献 / 341

第1章 绪 论

随着全球经济的快速发展,能源资源的消耗不断增加。由于传统化石燃料产生的温室气体排放严重,对环境和人类健康造成了重大影响,因此,寻找替代能源已成为全球关注的焦点问题。新能源正是一个可持续发展的选择,它不仅可以保护环境、减少气候变化的影响,而且可以促进社会经济、提高能源安全。

同时,新能源系统将融入互联网、大数据、人工智能等数字技术,实现能源系统数字化。每次能源革命都伴随着新技术的发展应用,如第一次能源革命中的蒸汽机,第二次能源革命中的内燃机和发电机,第三次能源革命除了应用风能发电、光伏发电、生物质能发电等技术外,还可以结合数字化新技术、减碳负碳技术。数字化的能源系统可以降低如分布式光伏这类分散、小型的发电设施的电网接入成本。在新能源系统中,每个能源生产者和消费者都是网络的节点,且能够实现双向转换。基于此架构,能源生产者和消费者可以在高效、透明、便利的环境中平等地使用能源互联网,使能源得到充分利用,减少中间成本消耗。

1.1 能源可持续利用时代图景概览

自工业革命以来,人类活动对生态环境的影响与日俱增,尤其是煤炭、石油等化石能源的广泛应用,使得二氧化碳(CO_2)排放量远远超出地球生态系统的自净能力,大气中的二氧化碳含量不断增加,地球升温,温室效应加剧。科学家预测,地球温度每升高 1°C ,海平面就会升高 2.3m。根据世界气象组织发布的数据,2024 年是有记录以来最热的一年,全年平均气温比工业化前(1850—1900 年)水平高出 1.55°C 。根据中国气象局发布的数据,1901—2023 年,中国地表年平均气温呈显著上升趋势,平均每 10 年升高 0.16°C ,高于同期全球平均升温水平;近 30 年,沿海海水表面温度升高了 0.9°C ,海平面上升了 90mm。

全球升温除引起海平面上升,导致人类的生存空间、活动范围不断缩小之外,也导致灾害性气候频发。例如,2019 年底至 2020 年初,澳大利亚持续 7 个月的山火烧毁土地 $600 \times 10^4 \text{hm}^2$ (公顷);2020 年 12 月,美国东北部遭受罕见暴风雪袭击,受灾人数达到 6000 万;2021 年夏天,加拿大和美国遭遇历史性高温天气,加拿大西部地区温度达到 49.6°C ,创下 84 年来最高温纪录;2021 年夏秋,欧洲遭遇极端强降水,德国、比利时、荷兰、奥地利等中西欧国家遭遇暴雨和洪灾;2022 年 4 月,南非东部地区遭遇南非近 60 年来最严重的强降雨天

气,强降雨引发的特大洪灾导致 341 人死亡、55 人受伤……

这样的气候灾难并不是近几年才出现的,只不过随着人类活动对地球环境的影响越发强烈,这类气候灾难的发生频率越来越高。为了应对气候问题,世界各国多次组织召开气候会议,先后形成了很多文件,包括 1997 年 12 月通过的《京都议定书》、2015 年在巴黎气候变化大会上达成的《巴黎协定》、2021 年在第 26 届联合国气候变化大会上达成的《格拉斯哥气候协议》等。

这些会议和文件讨论的核心议题就是如何减少碳排放、控制地球升温。其中《巴黎协定》确定了“将 21 世纪全球平均气温上升幅度控制在工业化前水平以上低于 2°C 之内,并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5°C 之内”的目标。有专业机构测算,要将地球气温上升幅度控制在 1.5°C 内,到 2030 年,全球人为的二氧化碳排放量必须比 2010 年减少 45%,在 2050 年前后达到净零排放。

于是,将地球气温上升幅度控制在 1.5°C 以内,到 2050 年实现碳中和,成为世界各国的共同愿景。截至目前,全球已经有 120 多个国家和地区作出了到 2050 年实现碳中和的承诺,包括美国、日本、韩国、挪威、瑞典、澳大利亚、加拿大、意大利等。为了响应国际社会的号召,2020 年 9 月,习近平主席在第 75 届联合国大会上提出:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。”明确了我国未来四十年的碳减排路线,体现了我国的大国担当。

作为世界上最大的能源消耗国与二氧化碳排放国,我国实现“双碳”目标的压力巨大:我国正处在工业化发展的后期,碳排放量依然处在高速增长阶段,经济增长很难在短期内与碳排放完全脱钩,而且 2060 年前实现碳中和的目标意味着我国要用 30 年的时间完成发达国家六七十年甚至上百年才能完成的任务,挑战难度可想而知。在此背景下,我国必须大力推动可再生新能源技术创新,政府引导、市场主导推广应用光能、风能、水能、氢能等新能源,逐渐引导并改变能源消费结构,积极融合大数据和人工智能等跨学科技术,以革新能源利用方式,发展智慧能源。

目前,关于智慧能源还没有形成统一的定义,本书认为智慧能源是互联网、大数据、云计算、物联网等新技术在能源生产、传输、存储、消费等环节的深度应用,进而催生出的的一种全新的能源产业发展形态,可以实现能源分布式监控与集中管理,提高能源自动化管理水平与利用效率,降低能耗。智慧能源还倡导革新能源体系,大力推广风能、水能、地热能、太阳能、生物质能、氢能等新能源,利用数字技术推动能源结构转型,基于 5G 技术打造智慧能源新生态,助力能源企业生产、管理、营销等环节实现自动化、数字化转型,基于区块链技术创新能源交易市场,完善能源交易方式。具体来看,智慧能源的应用场景有很多,包括智慧油田、智慧石化、智慧煤矿、智慧电力、智慧储能等。总而言之,智慧能源建设是一个比较复杂的问题,不只局限于能源行业,还涉及生产端与消费端的方方面面。

技术创新成为新能源发展的重要驱动力,中国、美国、日本、欧盟等众多经济体都十分重视发展能源科技。早在 2011 年,欧盟就制定了《2050 能源技术路线图》,加强可再生能源建设。2014 年,在奥巴马执政期间,美国发布了《全面能源战略》,加快低碳技术发展。2016 年,日本陆续出台的《能源革新战略》及《能源环境技术创新战略》,提出注重能源安全保障,同时加速推进可再生能源、储能技术发展。2020 年,中国作出“双碳”承诺,发展新能源是“十四五”时期重要的战略举措。

技术革新推动全球新能源发电成本大幅下降,光伏发电、陆上风电的平均度电成本分别



从 2000 年的 500 美元/(MW·h) 和 94 美元/(MW·h) 下降到 2021 年的 30~60 美元/(MW·h) 和 35 美元/(MW·h)。风光发电平价上网,使风电成本降至燃煤发电成本的一半,光伏发电成本也远低于燃煤发电成本。同时,光伏的钙钛矿、TOPCon(隧穿氧化层钝化接触)电池、异质结(HJT)电池,风电的碳纤维叶片、新型光纤复合电缆等各种新型技术路线层出不穷,成为行业降本的新动能。

绿色能源与数字化相互赋能,数字化能源企业协调能源系统的可再生能源,提前响应负荷用电需求,合理分配资源,大幅降低能源交易成本。

新能源发展初期,在产业技术、市场建设、投资水平上存在一定的门槛,需要公共部门高度重视,并提供良好的政策环境与支持保障,包括绿电网体系的建立健全、应用渠道和市场容量的深入拓展、技术研发和装备制造的优化升级等。目前全球众多国家制定了明确的新能源目标,出台了相应政策支持可再生能源发展与新能源发电比重提升,以光伏发电和风电为主要抓手,尤其重视发展海上风电集群、新能源发电与氢能结合应用、本土新能源汽车品牌、新能源产业链培育等内容(见表 1-1)。

表 1-1 全球主要国家新能源相关政策

国家/组织	时 间	政 策	主 要 内 容
美 国	2021 年 6 月	《锂电池 2021—2030 年国家蓝图》	支持新能源汽车和锂电池方面的技术创新,未来 5 年提供约 2 亿美元资金支持
	2021 年 9 月	《太阳能未来研究》	2035 年太阳能有潜力供应美国 40% 的电力,2050 年比例提升至 45%。2035 年太阳能光伏装机容量提升至 1000GW,并在 2050 年达到 1600GW
	2022 年 1 月	《海上风能战略》	2030 年海上风电装机容量达到 30GW 以实现二氧化碳减排 7800 万 t,2050 年达到 110GW 的海上风电装机规模
	2022 年 8 月	《通胀削减法案》	加大对美国国内新能源生产与制造业的投资,共计约 3690 亿美元,包括商业激励、税收抵免等
欧 盟	2020 年 7 月	《欧盟能源系统整合战略》	加强区域能源一体化建设,积极发展储能、数字化、氢能等能源科技,支撑更高比例的可再生能源发展,于 2030 年实现可再生能源占比 45% 的目标
	2022 年 5 月	“REpowerEU”(为欧盟重新供能)能源计划	2025 年和 2030 年分别完成 320GW 和 600GW 的光伏装机部署,引入义务“为所有新建筑物和能源绩效 D 级及以上的存量建筑(能源强度最高)的屋顶建造太阳能装置”
	2022 年 5 月	欧盟四国(丹麦、德国、比利时、荷兰)“北海海上风电峰会”	2021—2030 年四国新增海上风电装机容量 49GW,年均新增 5GW,2030 年年底达到 65GW; 2030—2050 年四国新增海上风电装机容量 85GW,年均新增 4GW,2050 年年底达到 150GW
中 国	2022 年 5 月	《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》	完善新能源产业发展相关政策
	2022 年 6 月	《“十四五”可再生能源发展规划》	“十四五”期间,可再生能源在一次能源消费增量中占比超过 50%; 2025 年,可再生能源年发电量达到 3.3 万亿 kW·h 左右; 风电和太阳能发电量实现翻倍

下面通过介绍丹麦、日本、美国的新能源政策及其取得的成就来了解全球新能源的发展概况。

1.1.1 丹麦——新能源事业的先驱者

自第一次石油危机爆发时起,丹麦政府就已实施开发与节约并重的能源战略,经过 30 多年的努力,成效显著。1990 年以来,丹麦在实现经济增长 45% 的同时,其能源消耗却维持不变,碳排放量还下降了约 13%。综合分析,丹麦新能源事业的成功经验有以下几点。

1. 着力开发优质资源,通过税收和价格等金融工具引导能源消费方式,并实现能源结构调整

第一次石油危机爆发后,丹麦政府痛定思痛,提出能源来源多元化的战略,利用价格杠杆,鼓励企业采用价格较为低廉的煤炭和天然气替代石油。

同时,丹麦率先征收能源税和碳税,鼓励发展新能源,鼓励企业和个人主动节能并提高能源效率。到 2005 年,丹麦石油消费占能源消费的比例已不到 42%,较之 20 世纪 70 年代的 93% 下降了 51%;天然气、煤炭和新能源的消费比例则从不到 1% 分别上升到了 22.76%、19.53% 和 15.35%。

2. 积极开发新能源,引领风力发电世界潮流

从 1980 年开始,丹麦利用资源优势,率先制定了鼓励发展风电的政策,大力发展以风能为主的新能源,持续投入约 20 亿美元支持风电技术研发和产业发展,要求电力企业全额收购新能源发电量。

截至 2006 年年底,丹麦风力发电装机容量达到 310 万 kW,占其发电装机总容量的 25%。根据丹麦政府提出的能源战略规划,预计到 2030 年,风力发电比例有望提高到 70%。

大力发展风电的国家战略还造就了维斯塔斯、恩德等一批世界级风电装备制造企业。在当今世界累计安装的风电机组中,60% 以上产自丹麦,约占世界风机贸易的 70%。

丹麦还游说欧盟大力发展海上风能,通过德国、波兰等与欧洲北部电网连接,从而将海上风电输送到欧洲。这一计划已列入欧盟支持海上风电发展的示范项目。为此,丹麦力争将 2020 年海上风电发展目标从目前的约 30 万 kW 提高至 300 万 kW。丹麦发展海上风电的根本目的在于大量向海外输送海上风电技术。毫不夸张地说,一旦世界海上风电市场形成,丹麦将成为最大的受益方。

3. 以集中供热为重点,大力发展建筑节能技术

丹麦地处北欧,日照时间短,采暖期长。针对这一国情,丹麦政府提出众多建筑节能措施:征收能源税和碳税,通过价格杠杆,提高居民的节能意识;要求开发商提供节能建筑标识,按照能耗高低对建筑进行分类分级管理,使用户根据需要进行选择用能;简化节能检测方法,重视、监管门窗和墙壁的保温效能,确保节能效果;为既有建筑节能改造提供补助。在建筑节能技术开发方面,丹麦重点发展热电联产和集中供热。丹麦通过积极推广上述政策,大大降低了建筑能耗。与 1972 年相比,丹麦的建筑供热面积增长了 50%,而相应的能源消耗却减少了 20%。

丹麦政府还特别重视分布式能源发展。丹麦相当数量的风电、生物质发电和热电联产都是以分布式供能方式开发建设的。这既使小型、分散、有效、清洁的新能源得以利用,也使



新能源发展与农村经济发展、边远地区经济发展紧密联系起来,增加了这些地区人民的收入,有效降低了供能成本。

4. 二氧化碳减排是推动丹麦节能和新能源技术发展的重要动力

丹麦凭借率先发展新能源的优势,不仅很好地履行了《京都议定书》的责任,还赢得了巨大商机。2005 年与 1992 年相比,丹麦出口的能源技术、产品和服务(主要是新能源和提高能效的技术、产品和服务)方面的收入由原来的 50 亿丹麦克朗提高到接近 400 亿丹麦克朗。

1.1.2 日本——新能源事业的开拓者

日本是一个自然资源匮乏的国家,加之 20 世纪两次石油危机给日本经济造成的严重打击,迫使日本政府开始推进新能源的开发利用。目前,日本新能源开发利用技术已遥遥领先,并且已成为其经济可持续发展的重要推动力。

1. 日本的新能源政策

1) 确定新能源政策的基本目标

能源安全、经济增长和环境保护,简称能源“3E”目标。在这一总体目标下,日本逐步形成了各项子目标:完成《京都议定书》规定的温室气体减排目标;提高能源使用效率,《新国家能源战略》提出,争取到 2030 年前将日本整体能源使用效率提高 30% 以上;能源多样化,开发利用新能源。

2) 制订推广新能源技术的计划和行动方案

1974 年,日本制订并实施了“新能源开发计划”,把发展太阳能和燃料电池技术定为国家战略;1978 年,日本实施了“节能技术开发计划”;1993 年,日本将前述两项计划合并后推出“能源和环境领域综合技术开发推进计划”,即“新阳光计划”,目的是促进新能源技术的开发利用和商业化。

1994 年 12 月,日本通过了“新能源推广大纲”,第一次正式宣布发展新能源和可再生能源。1997 年 12 月,日本又制订了“环境保护与新商业活动发展”计划,作为政府到 2010 年推动新能源和可再生能源发展的行动方案。2009 年出台的“未来开拓战略”则提出日本要建成世界第一的环保节能国家,并在太阳能发电、蓄电池、燃料电池、绿色家电等低碳技术相关产业的市场上确保所占份额第一,具体措施包括:太阳能发电及节能世界第一计划,实现环保型汽车的世界最快普及,以低碳交通为核心建设下一代城市等诸多政策。

3) 新能源技术的推广应用

首先,投入大量资金支持新能源技术的研发,例如,“新阳光计划”每年拨款 570 多亿日元研究新能源技术、能源输送与储存技术等;其次,鼓励政府、社会团体带头使用新能源;最后,直接补助使用新能源设备的家庭。

2. 日本新能源发展战略

1) 着力调整能源结构

“二战”后日本根据经济发展需要和国内外能源资源形势变化,对能源结构进行过较大的调整:20 世纪 50 年代能源结构以煤为主;20 世纪 60 年代调整为以石油为主;20 世纪 70 年代石油危机以后,日本为了规避石油风险,又将能源结构调整为由石油、煤、核能和天然气为主,以太阳能、地热、风能、生物能源等新能源为辅的更加安全的多元化能源结构。

2) 大力发展核电

日本早在 1956 年就制订了“核能研究开发和利用的长期计划”,通过自主研发和从美

国、英国引进先进技术与设备相结合,长期致力于发展核电事业。1970年,核能在日本一次能源中仅占0.6%;2007年,核能在一次能源中的比例已达到13%。这极大地提高了日本能源的国产份额,也很好保障了国家能源安全。

从消费终端出发改善能源结构,加强节能和环保。通过消费终端节能,追求“放大效应”(终端环节节约1份能量,相当于初始能源侧节约了5份能量)。

1.1.3 美国——新能源事业的领跑者

美国是世界上重要的能源消耗大国和石油进口国,其碳排放总量和碳人均排放量均居世界前列。因此,从美国自身能源安全和环保的角度来看,大力发展新能源已成为必然。

1. 美国新能源政策的主要内容

美国的新能源改革包括以下几方面的主要内容:

(1) 要求电力公司通过可再生能源发电和提高能源效率满足部分电力增长需求;到2012年,可再生能源发电量须占总发电量的6%,2020年提高至20%;根据美国能源部估计,至2030年,对清洁氢气、先进核能和长期储能等新能源技术和能源效率技术的投资规模将达到3000亿美元。

(2) 颁布和执行新的建筑、家用电器和工业节能标准。

(3) 实行美国主要碳排放源的排放总额限制,相对于2005年的排放量,到2012年削减3%,到2020年削减17%,到2030年削减42%,到2050年削减83%。

(4) 以7000美元的抵税额度鼓励消费者购买节能型汽车;动用200亿美元的联邦政府资金来支持汽车制造商研发先进的电动汽车和混合动力汽车,并制定了到2015年美国的插电式电动汽车销量达到100万辆的目标。

2. 新能源战略思维

美国时任总统奥巴马曾激情澎湃地表示:“哪个国家在清洁能源技术中领先,哪个国家就将引领21世纪的全球经济。”通过加大研发投入、鼓励创新,美国试图占领世界新能源技术制高点,重塑美国的国家竞争力。

美国占领世界新能源技术制高点的真正意图在于改变国际资源的分配体制,建立清洁能源结构,创造一个高达数十万亿美元的新型产业,大量增加国内就业机会,拉动美国经济再次崛起。

2010年起,美国公用事业规模的太阳能发电量开始增加。随着太阳能电池板的成本大幅下降,各州和联邦政府出台了慷慨的税收优惠措施,推动太阳能发电量激增。截至2023年1月,美国公用事业规模的太阳能发电装机容量为73.5GW,约占美国总发电装机容量的6%。2023年美国新增发电装机容量的一半以上是太阳能,这是美国单年新增太阳能装机容量最多的一年,也是美国新增产能中太阳能超过装机容量一半的第一年。

1.2 发展新能源的历史逻辑

能源是人类生产及生活必不可少的资源,是社会经济发展的动力。随着人口数量的增长,人们生活水平的提高,特别是经济的飞速发展,能源消耗迅速增长,由此产生一系列问题。



自18世纪第一次产业革命以来,传统化石能源为全球经济社会持续快速发展提供了源源不断的动力,推动了三次产业革命,创造了灿烂的人类文明,体现了化石能源在这一历史时期的先进性。

与此同时,继续依靠化石能源发展给人类带来的问题和危机也逐步显现:不可再生与不可持续性问题,严重的环境污染问题,CO₂排放与气候变化问题等,特别是CO₂排放导致大气中CO₂浓度增加的速度是地球历史上前所未有的。因此,地球温度上升的速度也是前所未有的。

面对此类关乎人类前途命运的问题,人类必须作出正确的判断与选择。而这一正确的选择,必将带来一场新的产业革命。

1.2.1 世界能源消耗趋势

1. 美国能源消耗模式

美国是世界上能源消耗最高的国家,只占世界人口6%的美国消耗的世界能源约为30%。而且美国能源消耗量仍在不断增加。据统计,2007年美国能源消耗量比1960年增加1.5倍,比1950年增加2倍。实际上无论是发达国家还是发展中国家,都把美国的生活水平作为自己追求的目标模式。发展中国家通过工业化,提高能源消耗达到美国生活水准。乔治·伍德威尔曾经估计,如果全世界的人都达到美国耗能标准,那么所需要的能源将是现在实际用量的6.6倍。斯塔尔按同类关系预测,到21世纪中叶,能源消耗量将是目前消耗量的100倍,令人不寒而栗。

2. 传统生产消费模式压力

伴随人口膨胀,人类对煤、石油和金属矿藏等不可再生资源的需求不断增加,人均消费水平也将随生活水平的提高而提高。表1-2列出了人口增长和人均消费水平提高对商业能源需求增长的相对贡献。这些相对贡献是用1960年的人均能源消费水平乘以2007年的人口水平计算出来的,其中,在人均消费水平保持不变时,能源消费水平的变化部分是人口增长的贡献,与2007年的实际能源消费变化的差值是生活水平提高的贡献。从全球来看,如果2007年世界人口对能源的消费水平保持在1960年的人均消费水平,那么1960—2007年能源消费上升46%,即能源消费上升的46%归因于人口增长,而另外54%则归因于人均消费水平的提高。不仅人口数量的增长会增加能源消费,人均生活水平的提高也会大大增加能源的消费。

表 1-2 1960—2007 年全球人口增长和能源消费

人口增长/%	人均消费水平提高/%	1960 年	2007 年
33	67	6	12
37	63	16	28
16	84	72	124
51	49	—	—
18	82	8	20
46	54	38	55

美国电力研究院安德森等用生活质量模型分析能源、国民生产总值和生活质量间的关系,把能够度量的社会、经济、文教卫生、环境以及国家实力与安全(包括自然资源、人力、对外国资源的依赖程度等)5 大类共 50 个变量输入模型,对人均国民生产总值超过 1000 美元的 50 个国家和地区进行对比。研究表明,人均国民生产总值的增长与生活质量的改善不一定有直接关系,当人均产值达到一定水平(约 3000 美元/(人·年))时,生活质量改善趋于平缓,甚至可能稍有下降。而人均能耗,尤其是人均用电量与生活质量之间却是直接成正比例的关系。

人类维持生存所需的能源,每人每年为 300~400kgce(千克标准煤)。据研究,小康生活所需的人均年能耗为 1200~1400kgce,其中若部分是非商品能源,则商品能源的人均年能耗为 900~1000kgce。美国海外发展委员会采用婴儿死亡率、平均寿命和文化水平三个因素,每个因素以世界上生活水平最低的国家为 1、最高的国家为 100,将三个因素综合起来得出某一国家的生活质量指数。发达国家的生活质量指数在 50~90,发展中国家在 15~90。研究表明,当人均年能耗达到 1200~1400kgce 时,生活质量指数约为 70,这一范围是起码的富足生活所需的能源。

另据美国学者哈夫纳的研究,在现代社会中,过起码的富足生活所需的人均年能耗为 1615kgce,大致相当于美国 20 世纪 20 年代的水平。美国布鲁克海文国立实验室对 84 个发展中国家的数据进行分析,得出人均产值达到 1000 美元时,人均年能耗约为 1500kgce。中国能源研究会根据上海市和北京市居民生活消费水平,对全国人均产值达到 1000 美元时的人均年能耗进行了初步预测,结果是 1230~1320kgce,参见表 1-3。

单位: kgce/(人·年)

方面	中国能源研究会预测		哈夫纳研究成果
	上海	北京	
衣	70	80	108
食	300	320	323
住	320	340	383
行	100	120	215
其他	440	460	646
总计	1230	1320	1675

能源是人类生产及生活必不可少的资源,是社会经济发展的动力。开发和利用能源,将会极大地推动人类社会和世界经济的发展和进步。然而,人类在享受各种能源所带来的好处的同时,也会遇到一系列的能源问题,即能源短缺和能源消耗带来的环境污染问题,这对人类社会的生存和发展造成了严重的威胁。当今世界正面临着人口与资源、社会发展与环境保护等多重压力的挑战,而支持社会发展的传统能源资源储量却越来越少。积极开发新能源、寻求可持续发展已成为很多国家的首要战略任务。

1.2.2 现阶段能源结构存在的诸多问题

目前,世界能源结构仍呈现以化石能源为主、多种能源共同发展的局面。可再生能源的发展前景让人类看到了曙光,但对于现阶段能源结构面临的诸多问题及潜在危机,人类必须



面对并作出预判。

1. 化石能源供给高度集中化,能源格局供给严重错位

传统化石能源储量分布呈现两个特点,即储采比有限及分布不均。

石油:全球石油资源分布很不均衡,中东地区资源丰富,亚太国家储采比低,欧佩克组织石油产量继续保持第一。分国家看,委内瑞拉和沙特阿拉伯的石油储量最为丰富,前十位国家的石油探明储量占全球储量的85%;分地区而言,中东地区石油储量包揽了全球储量的50%,且储采比远远高于全球平均水平。

天然气:全球天然气资源分布不均衡,且北美地区储采比较低。天然气资源最丰富的国家为伊朗和俄罗斯,前十位国家的天然气探明储量约占全球储量的80%。分区域看,天然气也主要集中于中东地区,储量占全球的42.7%,且储采比大于100,远远高于其他地区。

煤炭:煤炭是化石燃料中储采比最高的能源,资源分布高度集中。分国家看,美国储量最多,其次是俄罗斯和中国,前十位国家的煤炭探明储量占比超过65%。分地区而言,欧洲和俄罗斯的煤炭资源最为丰富,储量占比约为35%,储采比是全球平均储采比的两倍多;亚太地区煤炭资源并不充足,但产量稳居全球前列,储采比远低于全球平均水平。

化石燃料也被称为“精英能源”,主要是由其属性决定的。从它们被发现、开采、加工到运输以及后期应用都需要动用大量人力、物力及财力。因此,聚集资本的能力对资源开采与利用体系的有效运作是至关重要的。反过来,高度集中的能源基础结构又可以为其他经济产业的发展创造条件、提供样板。规模化和集中化的好处是阶段性降低了能源获取成本,但存在的隐患也会导致更大危机的到来。

能源供需可分为能源生产和消费。在能源生产端,产量格局在很大程度上取决于资源禀赋格局,其分布的不平衡性造成各地区产量相差很大。同时,生产成本和开采技术的影响也不可忽略,它们对生产也有一定影响。在能源需求端,需求与经济发展水平和人口数量息息相关,从而导致全球供需格局严重错位和不平衡。

尽管在世界范围内能源供需总体上保持平衡,供大于求,但这一平衡十分脆弱,区域性和时段性紧张带来的供给失衡长期存在。受世界人口增长、工业化、城市化等诸多因素拉动,全球能源消费呈现总量和人均能源消费量持续“双增”态势。

世界各国对资源垄断的程度日益加剧,争夺的方式也更加复杂,甚至不惜以战争方式予以控制。

2. 化石能源局限性越发明显

以化石能源为代表的传统能源发展至今,面临诸多问题,21世纪以来,这些问题越发突出。

1) 不可再生

虽然以化石能源为代表的传统能源的开发与利用促进了人类文明的进步,但是,化石能源都是亿万年前远古的生物质随着地壳的变迁,受到特定的地质压力和温度条件的影响而逐渐形成的矿物燃料,这些化石能源在人类的发展历程中起到了至关重要的作用。由于这些化石能源的形成时间以千万年为单位,在短时期内难以形成,所以现在的煤炭、石油、天然气及非常规油气资源都是不可再生的能源。无论化石能源濒临枯竭的论断是否成立,可以确定的是,人类大规模的开发利用必然导致化石能源总量(已知的和未知的)的减少。

2) 开采成本持续走高

从煤炭的使用到石油、天然气的大规模开发,从常规油气的大力普及到非常规油气的不断尝试,人类对化石能源的利用已经逐渐成熟,但不得不面对一个现实:化石能源开采成本持续走高。随着煤、油、气勘探开发逐步由开采条件相对简单区域向地形条件复杂区域转移,开采难度逐步加大,开采成本持续走高。而从形成角度看,非常规油气本来就是受限于开采技术的常规油气的低品位矿,开采成本必定高于同期常规化石能源。

3) 短期内不可替代

所有的能源更替都有一个共同点:都是耗时数十年的长期进程。现行能源的使用规模越大,替代能源的转换规模越大,更替的时间将越长,短期内通过能源替代技术改变能源结构的作用有限。低碳或无碳的替代能源技术仍有很大的提升空间,但受认知水平和科学技术的限制,未来道路较为曲折。

长期以来,世界各国基本形成了以油、气、煤为主的能源结构,对化石能源的依赖程度较高。现阶段开发的新型能源尚不能替代传统能源。

体量方面:目前应用的新型能源与化石能源不在一个数量级。从工业体系看,煤和石油作为化工原料,可以制成发展石油化工不可或缺的基础原料,如乙烯、苯、二甲苯等。通过产业链的不断延伸,下游化工产品种类也不计其数,如塑料、合成纤维、合成橡胶、合成洗涤剂、染料、医药、农药、炸药和化肥等,这些与国民经济发展紧密相关。因此,石油供应动荡将影响国民经济的稳定性。

经济性方面:没有任何一个行业是必须依赖石油的,无论是液体燃料,还是各种石油化工产品、精细化工产品,都可以依靠非石油资源来生产。实际上,通过 CO_2 来合成乙烯以及各种烃类的技术早就存在,有了这些基础化工原料,整个石油化工行业都可以被替代。问题在于,使用替代资源在成本上是否可以接受。目前来看,原油是一种相对廉价的能源,资源丰富,易于开采。但是,一旦原油因为逐渐稀缺和开采成本增加而逐渐失去优势,人们将可以承受替代能源的价格,化石燃料就会被逐渐替代。

在可以预见的未来,碳氢化合物将继续保持当前的主导地位。而天然气作为碳氢化合物中最清洁的一种,则会在短期内争取做大,并最终占有全球能源的更大份额。基于目前的科技现状和工业体系,化石能源替代还需要较长时间。

4) 环境污染和温室效应

传统化石能源带来的最大问题是严重的环境污染和温室效应,这一问题已经困扰人类上百年来。从生产端看,煤炭开采深度随着开采时间的延长逐渐加深,对自然环境及地层结构造成很大破坏,如矿山生态环境、生物栖息环境,以及对地表的破坏、引起岩层的移动、矿井酸性排水、煤矸石堆积、煤层甲烷排放等。而且,石油、天然气在开采过程中会带来地下水污染、土壤盐渍化、硫化氢排放等环境问题。从消费端看,受处理技术有限约束,化石能源利用过程中产生的大量 SO_2 、 CO_2 、 NO_x 、CO、烟尘和汞等污染物未能被有效综合利用,大量排放到空气中,而这些气体是造成大气污染和酸雨的主要原因。清洁化利用技术虽取得了极大的进步,但温室效应的“罪魁祸首” CO_2 的排放量并不会因此减少。

为了抵消化石能源的副作用,很多国家和地区已经或正在考虑征收资源税、碳税、环保税,或开展碳排放权交易等,但这些措施会进一步推动化石能源资源供应成本上涨。未来,世界能源消费量仍会持续增长,在 2050 年前后达到峰值并长期保持。在以化石能源为主体

的现有能源供应体系下,CO₂、硫氧化物、氮氧化物及粉尘颗粒物等污染物的排放量将继续增长,对环境的污染和全球气候的影响将日趋严重;温室效应带来的全球变暖加剧,将给人类社会带来一系列灾难,这在后文中将详细论述。能源利用下的环境污染如图 1-1 所示。



图 1-1 能源利用下的环境污染

随着化石能源的日益枯竭和环境压力的日益增大,各国政府纷纷提出低碳减排目标,倡导大力开发利用可再生清洁能源,将其作为缓解能源供应矛盾、减少温室气体排放和保护生态环境的重要措施。

能源是人类社会发展的物质基础,能源安全是国家安全的重要组成部分。当前世界能源格局和供求关系发生了深刻的变化,大力发展以新能源为主体的非化石能源成为世界能源供应体系的重要组成部分,是许多国家推进能源转型的核心内容以及应对气候变化的重要途径,也是保障世界能源安全和推动能源转型发展的必然要求。

能源低碳、清洁化发展已经成为全球能源发展的重要特征,也是我国深入推进能源生产和消费革命、推动能源生产和利用方式变革的重要技术措施。

近年来,能源转型逐步成为全球共识,欧盟、美国、中国、日本等主要经济体均制定了执行周期为 30~40 年的碳中和目标,在双碳战略、新能源平价上网、能源地缘变局等因素的共同影响下,各国将加速清洁能源转型与提升能源自主性上升到国家核心战略,全球新能源市场需求持续大幅扩容。

第2章 新能源概述

能源是推动社会发展的血液,随着技术创新和进步,人类社会经历了三次大的能源革命,一路从高碳能源向低碳、无碳能源演变。

2.1 三次能源革命

能源革命是推动人类社会发展的主要动力。可以说,能源的利用水平和利用效率决定了一个时代经济发展的路线和上限。

能源是重要的生产要素,能源革命促进了能源利用效率的提升,为生产方式的变革提供了更多可能。能源革命促使能源结构发生重大改变,也对生产生活方式、社会结构、国际关系等产生了深刻的影响。

能源革命与工业革命往往相伴相生,工业革命触发了能源革命,能源革命成就了新一轮工业变革。每一次能源革命都会带动经济产业结构的巨大变革,引发社会面貌的变化,推动人类物质财富的增加。人类历史上已发生过几次工业革命与能源革命,催生了众多新兴产业,为人类文明进步作出了重要贡献。目前,第四次科技革命正在酝酿,世界也迎来了第三次能源革命,高效化、智能化、绿色化的新能源应用未来可期。

1. 煤和蒸汽机,成就了第一次工业革命

第一次能源革命,世界能源结构首次产生巨大变革:煤炭作为燃料替代了柴薪。

第一次工业革命广泛使用蒸汽机,增加了能源需求总量,也给能源革命提供了动力。原始柴薪燃料受限多,其能量密度、释能时长、采运效率不足,不再适应工业社会的发展。高密度能源燃料——煤炭更适合大规模、重工业生产模式。就此,煤炭成为19世纪人类社会的主导能源。19世纪60年代,煤炭在英国能源消费中的比重达到92%,在法国、德国的能源消费比重均超过了50%。同时,蒸汽机技术也被广泛应用于煤炭开采领域,从而提高了煤炭生产效率,促进了煤炭工业的发展,工业技术也为大规模能源供应提供了保障。

第一次能源革命开创了经济发展的新模式,对全球历史进程产生了深刻影响。

第一次能源革命也成就了第一次工业革命,促进了工业经济发展。“煤炭+蒸汽机”使化学能转化为机械能成为现实,以极低的成本提高了人类可支配的能源总量,催生了众多新兴产业,带动了全球经济的发展。同时,煤炭取代木材,使能源行业成为工业生产的一部分,



改变了传统能源供给来自农业的特点,打破了“土地经济”的增长极限,促进了城镇化与就业,极大地影响了产业结构和人口结构。

第一次能源革命改写了全球地缘政治格局,一度造成了“西强东弱”的局面。能源领域每一次划时代的进步都会推动一些国家的迅速崛起。第一次能源革命带来了产业技术路线的根本性变化,英国率先把握历史机遇,发展工业,基于其煤炭领域的生产优势、广泛应用的蒸汽机技术,成为世界第一大工业国。同时,其他西方国家纷纷效仿,投身能源与工业革命的大浪潮,全球化出现萌芽,国际权力结构发生逆转,西方国家成为近代国际社会的主导力量。

2. 石油与电,开创传统能源利用新高度

第二次能源革命,石油和电大规模推广,实现了液态燃料的应用,扩大了二次能源使用范围。

科技进步是第二次能源革命的内生动力。石油分离技术保障了石油的经济价值,钻井技术为石油开采提供了条件,现代石油工业由此建立。石油取代煤炭成为最重要的一次能源,柴油、汽油应用逐渐增加,开创了化石能源广泛应用的新局面。20世纪50年代,全球众多国家工业化进展迅速,对石油的需求量呈指数级增长,石油逐渐对煤炭实现替代。同时,电磁学的进步为电力应用奠定了理论基础,发电机、电动机、交流输电技术的成熟为电力的规模化应用提供了技术,电力成为重要的二次能源消费形式。全球发电量大幅增加,从1950年的955TW·h上升至1995年的1.3万TW·h,一次能源用于发电的比例上升,电气化开始在全球铺开。

第二次能源革命在世界产业发展、国际格局等方面引发了巨变。

工业生产供给能力进一步加强,新兴产业迅速发展。石油成为航运、海运、汽运等行业的高效燃料,也成为纺织等加工行业重要的化工原料,极大地解放了人类生产力。同时,由于石油需要二次加工的特点,也促进了石油开采业、能源加工业的发展,实现了能源和工业产业链的深度拓展。电力为现代信息与通信业的发展奠定了基础,创造了无线电、电影等新兴产业。

二次能源革命以来,欧美等西方国家的经济优势进一步加强,全球地缘格局发生了重大改变,能源安全问题越发重要。至20世纪中期,西欧和美国的经济发展取得巨大突破,生产总值占全球的比重已超过50%。石油成为重要的战略资源,国际能源权力格局开始形成,能源问题导致的地缘冲突随之增加。能源安全成为国际组织的重要议题,深刻影响着国际关系。

3. 新能源革命:光伏、风电、氢能、储能、电动化、智能化,绿色低碳新时代到来

21世纪以来,国际能源形势发生了重大且深刻的变化,世界迎来第三次能源革命。在各国长期的政策支持下,技术不断革新,以风电、光伏为代表的可再生能源产业实现了快速发展,储能、氢能等新能源技术具备了规模化基础,站在了商业化关键节点,新能源汽车在应用端也加速了渗透。但是,石油、煤炭等传统能源仍占据重要地位,传统能源的使用惯性仍然存在,正处于剧烈变革时期。国际能源新体系的雏形正逐步形成,绿色低碳新时代的帷幕已悄然拉开。

4. 低碳是全球目标,促进新能源加速发展

当前,全球气候变化、低碳减排已成为国际共识,世界主要经济体纷纷提出到21世纪中

期实现碳中和的承诺。《巴黎协定》制定了可持续发展目标；国际能源署在《世界能源展望 2020》报告中提出，到 2050 年发展新能源对二氧化碳减排产生的贡献度要达到 32%。在低碳目标的推动下，新能源在全球能源生产消费中的比重不断提升，发展新能源成为实现碳中和目标的核心途径。

能源领域已经涌现国际碳中和竞争新格局，主要经济体都在加快部署和抢占全球零碳产业和金融增长“新赛道”。一场关于新能源革命的“马拉松”式竞赛已经拉开序幕。

欧盟将“绿色新政”作为欧洲复兴的重要支撑点，即使在欧盟委员会 2022 年 5 月提出的、意图摆脱对俄罗斯化石能源高度依赖的“为欧洲提供可负担的、安全和可持续的能源”行动计划中也未因为短期能源供应安全和价格上涨的巨大挑战而妥协，反而计划调高节能和可再生能源的目标，以实现欧洲能源更为独立。目前欧洲议会环境、公众健康和食品安全委员会采取更严格的举措，即碳边境调整机制(carbon border adjustment mechanism, CBAM)，从 2026 年 1 月 1 日起正式对“电力、钢铁、水泥、铝、化肥、氢”六大相关高耗能产品的直接和间接排放征收“碳关税”。计划到 2028 年 1 月 1 日，将征收覆盖范围扩大至约 180 种钢铁和铝密集型下游产品，包括机械、汽车零部件、家用电器等。

英国、美国、加拿大等国也在推动类似法案，并考虑打造一个所谓“碳关税联盟”，推行“国际碳会计准则”“绿钢俱乐部”等贸易保护措施。此外，欧盟还将正式实施“新版电池法规”，未来只有符合全生命周期碳足迹限额及再生材料使用最低比例要求的工业储能和电动汽车电池产品才能进入欧盟市场。

近年来，我国也积极参与全球碳减排，主动顺应全球绿色低碳发展潮流，并提出要在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。为实现这个“双碳”目标，除了节能之外，大力发展新能源也是关键所在。实现碳达峰、碳中和与我国全面建成社会主义现代化强国的第二个百年奋斗目标高度重合，事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。我国应该以我为主，将国家利益和全人类利益综合纳入考量，提出与我国发展阶段相适应、符合中国特色的碳中和发展战略及实施路径，通过几代人的不懈努力，实现能源革命和经济“新增长”。

5. 技术革新带来新能源行业“降本增效”

要实现全球长期可持续发展及碳中和的共同愿景，能源生产和消费必须发生与之相适应的深刻的、跃迁式的变革。建立能源领域新的生产力和生产关系，几乎是在不牺牲经济增长及生活消费品质的前提下高质量实现碳中和的唯一方式。综合考量自然系统碳汇及工程碳移除技术部署的限制，全球的温室气体排放将从当前约 600 亿 t 二氧化碳当量降低至 21 世纪末的 100 亿 t 以下。这将主要依靠能源技术创新来实现，核心是提高终端能源利用的电气化率并实现电力系统的深度脱碳。在供给侧，以先进核能和可再生能源为代表的非化石能源利用技术将与化石能源的深度脱碳技术形成成本的竞争和替代。高比例地使用间歇性的可再生能源，造成跨时空和多维度耦合的电力电量平衡难题，2017 年南澳大利亚、2020 年美国加州、2021 年中国东北都出现过部分因为新能源出力不足导致的紧急停电现象。未来可再生能源在电力系统中的装机和发电量比重有可能达到 80% 以上，旋转备用容量紧张、频率和电压波动性调节难度加大等问题将更为突出。在消费侧，因为新能源技术利用方式主要依靠发电，所以终端用能部门需要显著提升电气化水平，全社会电气化率将有可能达到 70% 左右。交通运输领域电力驱动的汽车、铁路、船舶需要得到更大范围的普及，钢



铁、水泥、化工、玻璃等工业部门中以电产热将成为新的生产工艺,特别是 1000℃ 以下中低温的热源替代;公共、商用和民用建筑中供暖、热水也需要进行电气化改造,电动汽车 V2G、光储直柔建筑、工业离散制造等灵活用电的体量和随机性加大,上亿级点位的交互受电充电,负荷响应弹性要求大幅上升。这些技术都需要在未来有安全、高效、优质、低成本的解决方案。能源技术创新是关系到源输荷储各层面的系统性变革,还将依托新型低排放基础设施的规模化建设和智慧互联。风电光伏大型基地、先进核能和小模块设施、灵活调节电源及储能等的辅助服务装备、远距离特高压输电、泛在电力物联网、虚拟电厂、新能源汽车充电桩和加氢站、电气化高速铁路和机场、氢能矿场和港口、大规模碳捕集和封存、碳移除和资源化利用工程、天地一体化智能碳计量和监测设备网络等新型基础设施建设将成为未来重要的投资方向。储能系统被认为是全球实现高比例可再生能源消纳的必要公共基础设施,电化学储能、抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、储热、蓄冷系统等提供了短时、季节性和长期储能的不同选择,储能和新能源装机容量的配比有可能需要实现 1:3 以上。除了主流的新型电力系统建设外,绿氢、绿氨、生物燃料、合成原料等在工业(如钢铁、水泥、化工)和交通(如长途货运、航运和航空)领域的应用也将更为广泛,传统生产和运输设施稍加改造将可以持续利用。

6. 数字化、智能化也是能源行业发展的主旋律

数字化、智能化可以引入 AI、大数据、物联网技术,实现电力与算力的融合。如此,不同基础设施之间,依托数字化技术与数据连接,实现更深层次的交互和交叉赋能。这种深层次的交互和交叉赋能在“双碳”背景下尤为重要,因为能源市场参与主体较为分散,再加上新能源供需错峰适配问题突出,需要能源网络进行数字化重组,实现更加灵活与智能的能源管理方式。

数字信息智能技术与低碳零碳负碳技术的系统化耦合和规模化应用也被特别关注。数字信息智能技术以其独有的计算和学习特性正在精细尺度的风光功率、终端负荷预测和风险预警、新型储能、调峰及其他辅助服务资源智慧调度、需求侧灵活响应等方面发挥重要作用。全球电子可持续发展倡议组织的报告表明,信息通信技术在未来十年内有潜力通过赋能其他行业,形成系统性的解决方案,协同减少 20% 的全球碳排放。

2.2 新能源的概念

新能源的定义有广义和狭义之分。广义的新能源主要实现了温室气体减排的效果,其中包括对能源和资源的高效的、综合的利用,还包括可再生能源、代替能源、核能、节能等。狭义的新能源是指将常见的一些常规性能源排除在外的,主要指大型水力发电之外的风能、太阳能、生物能、地热能、海洋能、小水电和核能等能源的总称。现阶段我国对风能、海洋能、小水电和核能的使用主要在电能的转换上,而对太阳能、生物能、地热能的利用除了转换为电能,还在向热能和燃气的转换上发展。总体来讲,新能源的利用主要是将各种能源转换为电能。

1980 年,联合国召开的“联合国新能源和可再生能源会议”对新能源的定义为:以新技术和新材料为基础,使传统的可再生能源得到现代化的开发和利用,用取之不尽、周而复始的可再生能源取代资源有限、对环境有污染的化石能源,重点开发太阳能、风能、生物质能、

潮汐能、地热能、氢能和核能(原子能)。

从联合国对新能源的定义至少可以看到三层含义：以新技术和新材料为基础；使传统的可再生能源取代有限的、对环境有污染的化石能源；可重点开发的可再生能源。

由此可见，新能源的发展是一个随着新科技和新材料的发展而循序渐进的长期过程，我们现在可能还处于起步阶段，具体表现在以下几个方面：

(1) 在重点要开发的太阳能、风能、生物质能、潮汐能、地热能、氢能和核能(原子能)等方向上已经有了一定的技术积累，为将来逐步取代化石能源打下了比较好的基础。

(2) 在能源转化上有了一些新的变化，水电、太阳能、核能等较清洁的能源使用比例在逐步提升，化石能源在有意地被替代，其比例在逐步下降。

(3) 储能和能源运输方式也在悄悄发生变化，煤炭、石油、天然气往往需要通过大船、铁路或管道进行长距离运输，而新能源电池技术的发展，则可以通过现有的高压输电网络，将电能输送到各个角落，从而大幅降低运输成本。

(4) 在政府和企业的推动下，新能源的概念已逐步深入人心，新能源汽车，太阳能、风能发电场等新能源利用模式方兴未艾，一步步走向寻常百姓家。

相信随着技术的不断进步，新能源将逐步取代化石能源，成为人们日常生活与生产中广泛普及的核心能源。

2.3 新能源的分类

新能源的分类方法有多种。

1. 新能源按其形成和来源分类

(1) 来自太阳辐射的能量，如太阳能、水能、风能、生物能等。

太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。可以通过光伏发电技术将太阳能转化为电能，如图 2-1 所示；也可以将太阳辐射能转化为热能。太阳能具有分布广泛、无污染、可再生等特点，可以作为替代传统能源的一种清洁能源。它的利用主要集中在太阳能发电、太阳能取暖等方面。随着科技的进步，太阳能光伏发电正在被大范围使用。我国的太阳能资源十分丰富，除了发电之外，目前对太阳能的利用有太阳能集热器、太阳能温室、太阳能干燥、太阳能制冷等。



图 2-1 太阳能光伏板示意图



水能是指利用水的动力进行能源转换的一种能源。水能主要包括水电能和潮汐能。水电能通过水流的动能转化为电能,是一种常用的清洁能源。图 2-2 所示是长江三峡水利枢纽工程开启深孔泄洪示意图。



图 2-2 2020 年 8 月 19 日拍摄的长江三峡水利枢纽工程开启深孔泄洪

风能是指利用风的动力进行能源转换的一种能源。可以通过风力发电技术将风的动能转化为电能,如图 2-3 所示。风能具有风力资源丰富、无污染、可再生等特点,可以有效降低人们对化石能源的依赖,减少环境污染。

生物能是指利用有机物质进行能源转换的一种能源。生物能主要包括生物质能和生物油。生物质能通过生物质的燃烧或汽化将有机物质转化为热能或燃料,是一种可再生的能源,如图 2-4 所示。生物油利用植物油或动物油进行能源转换,可作为替代石油的一种清洁能源。



图 2-3 风力发电示意图



图 2-4 生物质能示意图

(2) 来自地球内部的能量,如核能、地热能。

核能是指利用核反应进行能源转换的一种能源。核能主要通过核裂变或核聚变将核反应中的能量转化为电能,如图 2-5 所示。核能具有能量密度高、效率高、碳排放少等特点,但也存在核废料长期储存和核辐射安全等问题。

地热能是指利用地壳内部的热能进行能源转换的一种能源,如图 2-6 所示。地热能主要通过地热发电技术将热能转化为电能。地热能具有稳定性强、无污染、可再生等特点,适用于区域资源丰富的地区。

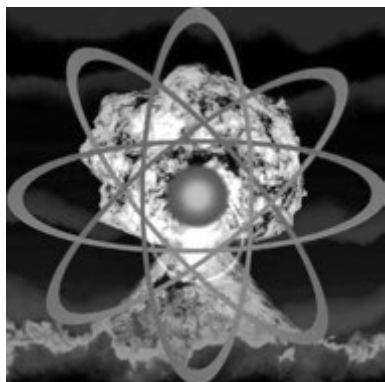


图 2-5 核能示意图



图 2-6 地热能示意图

(3) 天体引力能,如潮汐能。

潮汐能利用潮汐的涨落进行能源转换,如图 2-7 所示,具有可再生、稳定性强等特点。



图 2-7 潮汐发电示意图

随着人们对传统能源紧缺的压力感知和环境保护意识的提高,人们逐渐认识到发展新能源具有重要意义。不同类型的新能源互相补充,可以形成能源多样化的格局,降低能源的短缺风险,减少环境污染。同时,新能源的开发和利用也要不断提高技术水平,降低成本,促进新能源产业的快速发展,为人类提供清洁、可持续的能源供应。

2. 新能源按开发利用状况分类

(1) 常规新能源: 指的是技术上成熟、使用比较普遍的能源,如水能、核能。

(2) 新能源: 是指常规新能源之外的各种能源形式,通常是新近利用或正在着手开发的能源。它的各种形式都是直接或间接地来自太阳或地球内部深处所产生的热能,如生物能、地热、海洋能、太阳能、风能。

3. 新能源按属性分类

(1) 可再生能源: 能够不断得到补充以供使用,如太阳能、地热、水能、风能、生物能、海洋能。

(2) 不可再生能源: 须经过漫长的地质年代才能形成,而无法在短期内再生,如核能。

4. 新能源按转换与传递过程分类

(1) 一次能源: 直接来自自然界的能源,如水能、风能、核能、海洋能、生物能。

(2) 二次能源: 指由一次能源直接或间接转换成其他种类和形式的能量资源,如沼气、



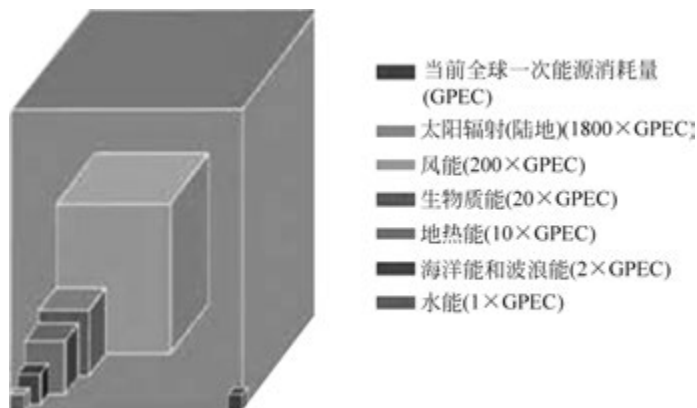
蒸汽、火电、水电、核电、太阳能发电、潮汐发电、波浪发电等。

2.4 新能源的特点

新能源是指以可再生能源为主体的能源,相对于传统能源具有以下主要特点。

1. 可再生性

新能源主要依靠可再生能源,可被人类持续利用。如太阳能、风能、水能、地热能等,这些能源是自然界不断恢复和循环利用的能源,不会因为使用而枯竭。相比之下,石油、煤炭等传统能源是有限资源,并且使用过程中会产生大量的污染,对环境造成严重影响。具有再生能力是除核能外其他新能源家族成员的共同基因。在人类文明存续的时间尺度内,新能源可以持续不断地向人类提供能量,而且它们所能提供的能量远大于人类的能源消耗量。各种可再生能源的资源潜能如图 2-8 所示。



彩图

图 2-8 可再生能源的资源潜能

2. 清洁性

新能源的利用无碳或低碳含量,对环境的影响小,不会产生或产生较少的污染物,可以有效减少大气污染和气候变化等环境问题。例如,太阳能和风能的利用过程中不会产生 CO_2 等温室气体,对缓解气候变化起到了重要作用。一方面,新能源都具有实现 CO_2 零排放的潜质,这种潜质一旦被完全开发,能源消耗与 CO_2 排放之间的耦合关系将会被解除。当然,这要待能源实现完全转型后才能够实现,因为目前新能源在生产利用过程中还没有完全脱离对化石能源的依赖。另一方面,新能源利用过程中污染物排放少,太阳能、风能和海洋能等在利用过程中不产生大气污染物,而生物质直接燃烧所产生的大气污染物低于化石能源。

3. 分布广泛性

新能源的资源分布广泛,有利于小规模分散利用。如太阳能的辐射能够覆盖全球大部分地区,风能也可以在海洋和陆地上进行。相比之下,传统能源的资源分布较为有限,需要集中开采和运输,导致能源供应的不均衡问题。

4. 安全性

新能源的利用相对安全,不会引发类似石油泄漏和核能事故等灾难性事件。相比之下,

石油、天然气等传统能源的开采和利用会对环境和人类安全带来很大风险。

5. 储量丰富

虽然新能源主要依靠自然界的能量转化,但与传统能源相比,其总资源储量是较为丰富的。太阳能是地球上最主要的能量来源,每年接收到太阳辐射的总量是人类能源需求的数千倍。根据美国能源部的报告,太阳能潜在资源 120000TW,实际可开采资源达到 600TW。根据中国气象局的资料,我国离地 10m 高的风能资源总储量达到约 32.26 亿 kW。其中,陆地上可开发和利用的风能储量有 2.53 亿 kW,而近海的可开发和利用风能储量则有 7.5 亿 kW。

6. 可持续性

新能源的利用有利于实现能源的可持续发展,能够在满足人类能源需求的同时,不会对子孙后代的能源需求产生限制。相比之下,传统能源的大量消耗和环境污染严重影响到了地球生态系统的平衡和人类的可持续发展。

7. 能量密度低

以功率密度作为评价指标,光伏电池板和生物质的功率密度分别为 $50\sim 60\text{W}/\text{m}^2$ 和 $0.1\sim 0.2\text{W}/\text{m}^2$ 。而在现代社会,超市和办公建筑的功率密度为 $200\sim 400\text{W}/\text{m}^2$,高层建筑则高达 $3000\text{W}/\text{m}^2$,钢铁等能量密集工业活动则为 $300\sim 900\text{W}/\text{m}^2$ 。由此可见,新能源的功率密度难以与化石能源世纪形成的社会模式相适应。

8. 供应存在间歇性

太阳能和风能都直接受天气影响,存在间歇性。间歇性带来能量产出的不稳定,这与社会对能源的连续性需求不匹配。为解决这个问题,发展储能技术势在必行。

综上所述,新能源具有可再生性、清洁性、分布广泛性、安全性、储量丰富和可持续性等优点,也有能量密度低、供应间歇性等缺陷。因此,人类围绕新能源开展研究的主要目的就是扬长避短,从而使以新能源为主构建的能源体系能够支撑人类社会的可持续发展。随着环境问题和能源需求之间的矛盾日益凸显,新能源的开发和利用将成为未来能源领域的重要方向。

2.5 储能

储能又称蓄能,是指将能量转换为在自然条件下比较稳定形态的过程。储能虽然不是能源,但由于新能源存在波动性和间歇性的特点,其在太阳能、风能等新能源系统中的作用非常重要。

2.5.1 储能方式

储能主要包括储电与储热。目前储能方式主要分为物理储能、化学储能、电磁储能和相变储能四大类。常用的储能技术有以下几种:

(1) 抽水蓄能是目前广泛采用的大规模、集中式储能手段,属于物理储能。其应用需要配备上、下游两个水库。在负荷低谷时段,抽水蓄能设备工作在电动机状态,将下游水库的水抽到上游水库保存;在负荷高峰时段,抽水蓄能设备工作在发电机状态,利用储存在上游水库中的水发电。抽水蓄能电站参见图 2-9。



(2) 飞轮储能是另一种物理储能方式,是将能量以动能形式储存在高速旋转的飞轮中。储能装置由转子、高速轴承、双馈电机、电力转换器和真空安全罩组成。电能驱动飞轮高速旋转,电能变成飞轮的动能储存;需要用能时,飞轮减速,电动机作为发电机运行。飞轮的加速和减速实现了充电和放电。图 2-10 所示是一个飞轮储能装置。



图 2-9 抽水蓄能电站

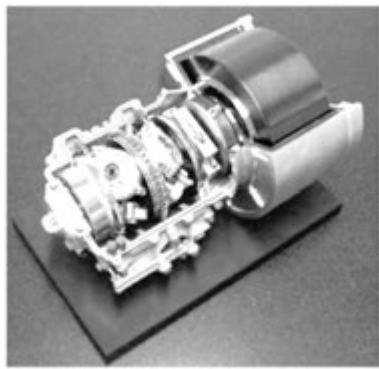


图 2-10 飞轮储能装置

(3) 超级电容器是一种介于常规电容器与化学电池两者之间的新型储能元件。超级电容通过物理分离正、负电荷来储存能量,电荷存储在由绝缘体分开的两个平行板上。它具备传统电容那样的放电功率,也具备化学电池储备电荷的能力。与传统电容相比,它具备法拉级别的超大电容量、较高的能量、较宽的工作温度范围和极长的使用寿命,充放电循环次数达到十万次以上,且不用维护。与化学电池相比,它具备较高的比功率,且对环境无污染。图 2-11 和图 2-12 分别是超级电容器结构示意图和商业化的超级电容器外观图。



图 2-11 超级电容器结构示意图



图 2-12 商业化的超级电容器外观图

(4) 压缩空气储能也是一种物理储能方式,是由两个循环构成的储能过程:一是充气压缩循环,二是排气膨胀循环。压缩时,双馈电机作为电动机工作,利用谷荷时的多余电力驱动压缩机,将高压空气压入地下储气洞;峰荷时双馈电机作为发电机工作,储存的压缩空气进入膨胀系统中做功(如驱动燃气轮机)发电。压缩空气储能系统如图 2-13 所示。

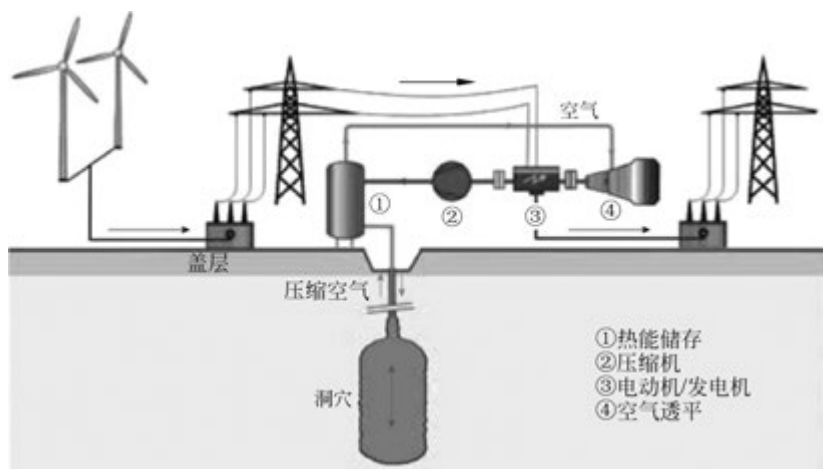


图 2-13 压缩空气储能系统

2.5.2 储能技术的应用

储能技术的应用领域很广,从电子产品到能源交通领域都有应用,例如电动自行车、电动汽车、电网调峰等。储能在电力系统有着广泛应用,涵盖发电、输电、配电和终端用户的所有方面。电网系统的储能技术包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、化学电池储能、超级电容器储能等。除了比较成熟的抽水蓄能,其他储能技术还处在工业化初期或研发阶段。鉴于储能行业的重要性,各国政府都在大力发展储能技术。太阳能和风能的快速发展非常需要储能技术的支撑,新能源电动汽车的核心技术之一是储能,由分布式发电装置构成的微电网也离不开储能。

1) 新能源电动汽车

光伏发电和风力发电受气候和环境的影响很大,输出功率具有不稳定性 and 不易预测性。因此,独立光伏系统和风电系统均需要配置一定容量的储能装置,以确保负载用电的持续性和可靠性。在交通领域,储能已成为电动汽车发展的关键,电动汽车的充电、续航里程和安全都与电池密切相关。新能源汽车主要由电池驱动系统、电机系统和电控系统及组装等部分组成,其中电机系统、电控系统及组装和传统汽车基本相同,差价主要由电池驱动系统所致。从新能源汽车的成本构成看,电池驱动系统占据了新能源汽车成本的 30%~45%,而动力锂电池又占据电池驱动系统 75%~85%的成本,因此,高性能的动力电池是电动汽车的核心技术之一。

2) 微电网

微电网是由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统,是一个具备自我控制和自我能量管理的自治系统,微电网系统的组成如图 2-14 所示。微电网既可以与外部电网并网运行,也可以孤立运行。

近年来,微电网的发展在世界各国受到高度重视。在欧盟发布的《智能电网:欧洲未来电力发展愿景》绿皮书以及美国能源部出台的 Grid 2030 发展战略中,微电网均是重要内容。在我国,2015 年国家能源局专门发布的《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导

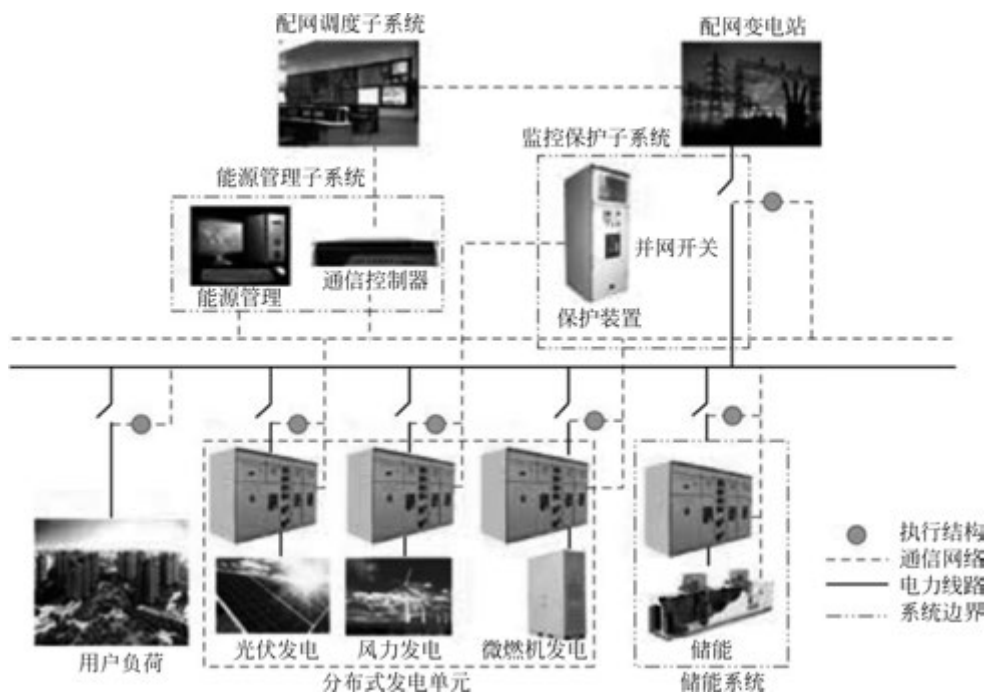


图 2-14 微电网系统的组成

意见》提出，“新能源微电网代表了未来能源发展趋势，是贯彻落实习近平总书记关于能源生产和消费革命的重要措施，是推进能源发展及经营管理方式变革的重要载体，是‘互联网+’在能源领域的创新性应用，对推进节能减排和实现能源可持续发展具有重要意义。同时，新能源微电网是电网配售侧向社会主体放开的一种具体方式，符合电力体制改革的方向，可为新能源创造巨大发展空间”。

微电网的研究与应用已在全球范围内广泛展开。随着微电网技术的不断成熟、新能源发电成本的下降、储能产业发展以及未来化石能源价格的持续上涨，微电网将会实现爆发式增长。

2.6 新能源的发展趋势及展望

随着全球能源消耗和环境污染问题的日益加剧，新能源的开发和利用越来越受到人们的关注。人类有能力通过发展新能源的方式解决气候变化问题，并且在积极应对这一问题的过程中，还将建立崭新的工业体系，提供更多的就业机会，创造绿色、低碳、环保的 21 世纪。

我们在不断探索新能源的同时，也在不断完善既有的新能源技术。那么，新能源发展的趋势和未来展望是什么呢？

2.6.1 新能源发展趋势

1. 全球新能源发展趋势

国际可再生能源署(IRENA)发布的《可再生能源发电能力统计 2025》显示，2024 年全球可再生能源发电能力新增 585GW，增幅为 15.1%；可再生能源总发电能力达 4448GW，

创下历史新纪录。全球新增发电量的 86% 来自可再生能源。IRENA 预测,2050 年可再生能源占发电总量的比例将达到 90%。

全球新能源发展趋势体现在以下几个方面:

(1) 智能化和数字化。新能源技术正逐渐智能化。例如,物联网和人工智能技术的应用,使得能源系统更加智能、可靠和高效。同时,数字化技术正在改变能源行业。数字化技术可以帮助管理能源系统,提高效率和降低成本。

(2) 多元化。未来新能源的发展将更加多元化。作为一种替代传统能源的绿色能源,新能源在种类上将会越来越多样化,包括太阳能、风能、水能、生物质能等,这些能源的不断发展和完善,将更加深度替代传统化石燃料。

(3) 分布式发电和能源互联网。分布式发电和能源互联网的发展也是未来新能源发展的重要趋势。分布式发电通过利用可再生能源,减少了对煤炭、石油等化石能源的依赖,这不仅有助于缓解全球能源短缺的问题,还减少了因开采和燃烧化石能源而产生的环境污染和温室气体排放。同时,能源互联网将能够支持新能源与传统能源之间的互动和优化,增强能源的互通互补和普及。

(4) 低成本和高效率。新能源的成本较高一直是制约其发展的一个关键因素。未来,新能源的研发将会更加注重降低成本和提高效率,这也将促进其在市场中的竞争力和发展速度。

2. 高速发展的中国新能源行业

目前,中国在可再生能源发电、氢能、储能与动力电池等新能源相关产业整体保持了高速增长态势,在全球市场独树一帜,全面占据市场领导者地位。

(1) 可再生能源发电:中国新增装机容量领跑全球,2025 年贡献 452GW。

(2) 储能:中国市场仍以抽水蓄能作为主要方式,2025 年装机总量达到 65.9GW;彭博新能源财经预测,中国将在 2030 年取代美国成为全球最大的储能市场。

(3) 动力电池及锂电池供应链:中国市场同样保持了高速增长的态势。2024 年中国动力电池装机总量达到了 769GW,同比增长 40.4%。

(4) 氢能:中国是全球最大的氢气消费国,随着绿氢成本劣势的消除,2030 年中国绿氢需求规模预期最高可达 2229 万 t,2060 年最高可达 1.1 亿 t。

然而,在全球人口、经济、能源需求持续增长的前提下,各国现有的能源转型步伐远远无法达成在 21 世纪将地球升温控制在 1.5℃ 以内的目标,更为积极、更大范围地推进新能源,特别是可再生能源规模的扩大将是各个国家与地区、各个行业的必然选择。无论是油气与电力等传统能源企业、蓬勃发展中的新能源企业,还是制定能源政策的公共服务部门,都需要加快步伐、果断行动。

2.6.2 新能源及其行业发展趋势展望

1. 新能源发展展望

1) 对环境的影响

未来新能源将会取代传统化石燃料,减少温室气体排放和对环境的污染,更好地保护自然环境和地球的健康。

2) 经济社会发展

新能源的发展将会对全球的经济和社会产生积极的影响。新能源的普及将会为能源领域带来更加多元和可持续的发展模式,从而使能源产业更加高效和稳定。

3) 对人类生活的改善

新能源的发展也将带来人类生活的全面变革。通过分布式能源系统和智能化的能源管理,人们可以享受更加低成本以及高效、可靠的新能源服务,从而进一步提升人类的生活质量和环境创新。

4) 新技术的推广与应用

新能源技术不断取得突破,如太阳能电池转换效率的提高、风力发电机组的优化设计、储能技术的进步等。这些技术创新将使新能源更具吸引力,推动其快速发展。新能源的成本较高一直是制约其发展的一个关键因素,未来新能源的研发将会更加注重降低成本和提高效率,这也将促进其在市场中的竞争力和发展速度。

2. 新能源行业发展趋势

新能源的增长正在改变传统能源结构,深入理解其未来的发展趋势、构建新的愿景,对于确保新能源在成本、可靠性及规模化能力等方面的竞争力尤为重要。以下总结了未来将对新能源行业产生深远影响的五大趋势,以助力加速能源转型。

趋势一：先进设计。

通过应用更为领先的技术、材料及设计原则,改进新能源生产体系的效率、可靠性及可持续性,如图 2-15 所示。如先进设计与数字化,预计到 2030 年可以帮助光伏发电产业将太阳能电力供应平准化成本(levelized cost of electricity, LCoE)下降 40%~50%,助力陆上风电企业在 2030 年实现 14%的成本节降。



图 2-15 先进设计技术

趋势二：能源物联网。

将物联网领域的数字化与通信等创新技术应用到新能源体系中,并实现在可再生能源发电、输配送网络的整合与融合,如图 2-16 所示。全球能源物联网的规模预计将从 2023 年的 202.3 亿美元提高至 2028 年的 453.6 亿美元。

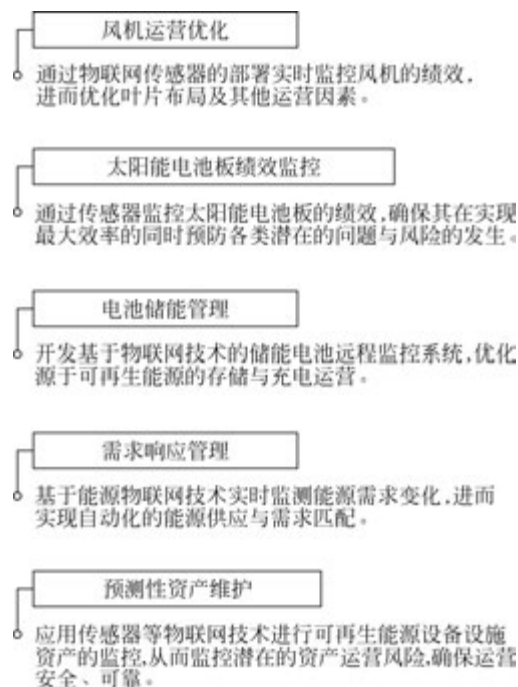


图 2-16 能源物联网

趋势三：储能技术。

目前各类主要可再生能源发电过程的非持续性导致对长时能源存储设备的需求日益旺盛,而传统的锂电池无法满足该需求,为各类替代性可再生能源储存技术的发展带来了机遇。随着对电网供应稳定性与灵活性的要求日益提高,全球对于固定型电池存储的市场需求预计将从 2019 年的约 3GW 增长到 2030 年的 430GW,年复合增长率高达 50% 以上,如图 2-17 所示。

趋势四：混合电厂。

通过两种及以上的可再生能源发电组合实现单一连接点的电力供应共享。混合电厂能够通过最大化现有资源的使用价值,减少对备份能源供应的需求,降低整体能源供应系统的成本,提升可再生能源应用的经济性,如图 2-18 所示。

趋势五：全系统可视化。

通过对新能源体系中各个环节与要素的实时绩效分析、监控与全过程可视化,实现对新能源生产、储存与消费的全面追踪,以及对于各类问题、风险及低效与失效点的跟踪、监控与改进,如图 2-19 所示。仅在欧盟地区,数字化赋能的需求响应和储存能力的增加,可以在 2040 年将太阳能光伏及风能的限制性因素从 7% 降低到 1.6%,进而减少 3000 万 t 的二氧化碳排放。

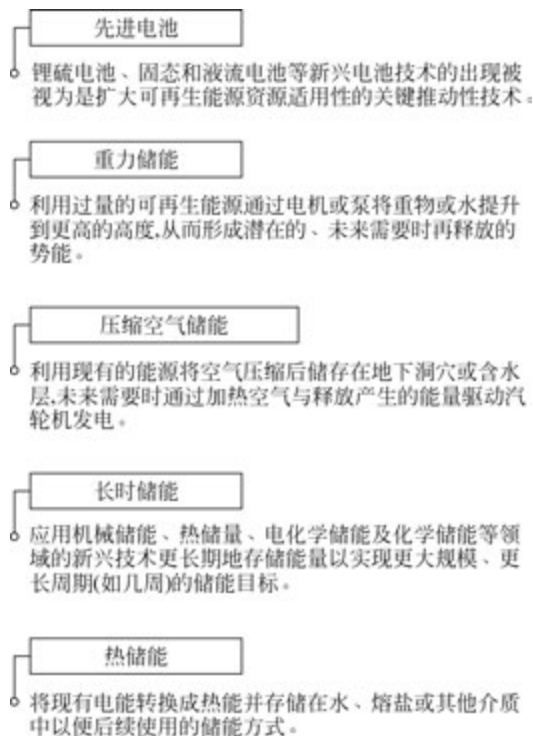


图 2-17 新型储能技术

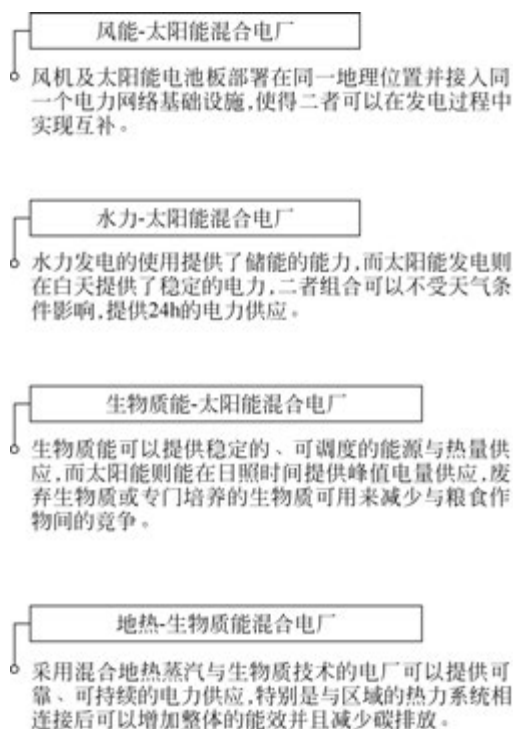


图 2-18 各种混合电厂

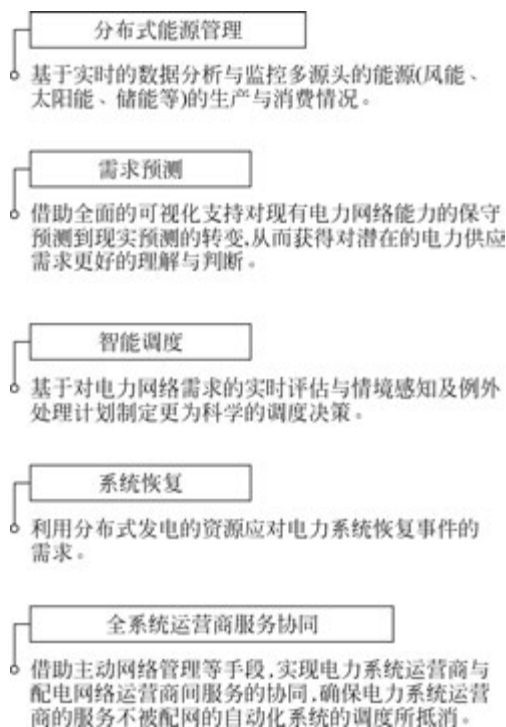


图 2-19 全系统协同示意图

第3章 太阳能——新能源的领军者

人类探索太阳能利用已有数千年历史。进入 20 世纪末、21 世纪以来,光伏发电的规模化部署具备重大战略价值。在产业发展初期,光伏能够帮助各国增强能源供应安全、平抑能源价格波动;如今,它更是实现无碳能源生产的可靠路径,也是减缓人为因素引发气候变暖的关键手段。

过去很长一段时期,大众对太阳能存在固有认知:在吉米·卡特执政时期,光伏产品成本高昂、落地条件受限,仅被视作环保主义者的理想化设想。但这一判断早已不符合当下产业现实。多项独立研究证实,光伏发电度电成本已低于核电、传统化石能源等各类发电技术,成为当前经济性最优的发电方式。2025 年,全球光伏新增装机容量约 600GW,光伏发电量已占全球总发电量的 8%,该比重仍将持续提升。多家能源机构预测,在深度低碳转型情景下,2050 年光伏发电有望成为全球主导发电技术,发电量占比可达 60%。图 3-1 展示了 1980—2050 年全球各类发电技术的发电量演变趋势,清晰呈现传统燃煤发电逐步缩减、光伏与风电等新能源发电量快速扩张的长期格局。

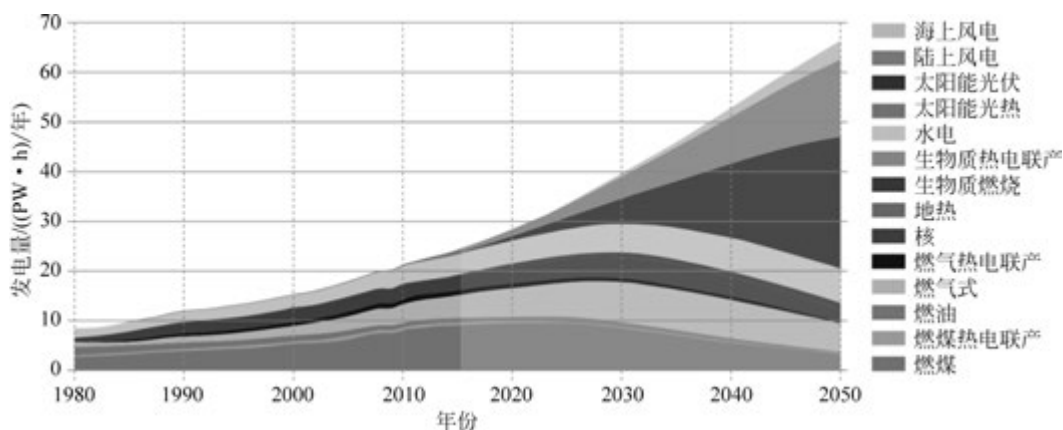


图 3-1 1980—2050 年发电技术的演变

太阳能光伏技术是一种将太阳能转化为电能的技术,通过将太阳辐射能转化为直流电,再经过逆变器转化为交流电,最终供给家庭和工业用电。太阳能光伏技术具有可再生、环



保、分布式结构、不受地域限制等特点,是一种非常具有前途的新能源技术。其没有活动部件,不需要液体或气体燃料,不产生任何废水,也不产生噪声。另外,阳光资源十分充足,输送到地球表面的阳光是人类总能源消耗量的 6000 倍。它是唯一能够在 2050 年之前满足世界能源无碳需求的可再生资源,并且将在未来 50 亿年中保持可用状态。

此外,光伏技术易于扩展,小型电池可以用来产生计算器和手表等消费设备所需的几毫瓦电力,而较大的电池可以用来组装用于千兆瓦级装置的模块。正是这些优势促使许多倡导者在面临强烈反对的情况下继续推广光伏发电。

3.1 太阳能的概念

前文简单介绍了太阳能发电的基本情况,本节将简单介绍一些太阳能的基础概念。如果从太阳能的起源开始,可以追溯到太阳和地球的形成。事实上,我们使用的所有能源都直接来自太阳;只有原子能和地热能是并非直接源自太阳的资源。阳光促进了生物的生长,从而形成了地球上的煤炭、石油和天然气矿藏。

如果从太阳能首次用于发电的时间开始,可以追溯到 1921 年 Albert Einstein 获得诺贝尔奖之前,许多人会惊讶地发现他获得诺贝尔奖是因为他在光电方面的工作,而不是量子理论。此外,需要回顾一下 Becquerel 家族在 20 世纪发现从阳光中产生电荷的现象——光伏效应方面所取得的成就。可以从中了解 Bell 实验室和其他实验室在 20 世纪中叶在早期太阳能电池方面的工作,以及 1958 年光伏(photovoltaic, PV)设备在太空中的首次应用。

在介绍这些太阳能的应用前,首先需要了解太阳能的定义。太阳能是太阳发出的电磁辐射,1h 内落在地球表面的能量足以为其提供一整年的电力。据估计,需要大约 50 万 km^2 的太阳能系统才能提供我们所需的所有能源。地球上的每个地方在一年中至少有部分时间能接受阳光照射。到达地球表面任何一点的太阳辐射量随位置、季节、一天中的时间、天气、景观和阴影的不同而变化。

如图 3-2 所示,太阳以不同角度照射地球表面,范围从地平线正上方到正上方 90° 。太阳在天空中的位置越低,其光线穿过大气层的距离就越远,光线变得更加分散和扩散。光线穿过大气层的距离——或者严格地说是与太阳直射头顶时的距离之比,被称为“气团”。

地球自转的倾斜轴会影响一年中特定地点和时间的阳光量。纬度 40° 左右的地点在仲夏接收到的太阳能量是仲冬的两倍以上,而在纬度 56° 附近(莫斯科、爱丁堡或合恩角)仲夏和仲冬的比例增加到约 5 : 1,在热带地区夏季到冬季的变化较小。

当太阳光线进一步穿过大气层时,一些光线被云、薄雾、水蒸气、沙子、灰尘和烟雾吸收、散射和反射。从太阳直接到达地球表面而不经扩散的太阳辐射称为直接辐射,被散射的



图 3-2 太阳能光伏发电系统

光称为漫射辐射,漫射太阳辐射和直接太阳辐射的总和称为总辐射,这也是目前太阳能的主要来源。

3.2 太阳能的转换利用技术途径

虽然太阳的功效自古以来就已得到认可,但其作用主要是作为热源和照明源。直到近现代,太阳光和电力之间的联系才建立起来,本节将介绍两种主要的太阳能转换利用技术。

3.2.1 光热发电

目前大多数(但不是全部)太阳能系统都基于光伏电池。然而,为了内容的完整性,先简单介绍太阳能转换的另一种主要形式——光热发电。

光热发电也称聚光太阳能发电(concentrated solar power generation,CSP),其主要原理是利用太阳的热量发电。光热发电的原理是利用大规模阵列抛物或碟形镜面收集太阳能,采用换热装置产生蒸汽,并通过传统汽轮机发电。其优点是电能质量高且稳定性较好。另外,光热发电可以利用熔盐储存能量,在无直射光时仍可带动汽轮机发电。但其涉及的技术环节较多,且当下技术不够成熟,成本较高。

此应用在高温下收集热量的两种主要方法之一是使用所谓的“发电塔”:一大片镜子将太阳光线聚焦到塔顶的锅炉上,如图 3-3 所示。

另一种方法是使用抛物面反射器“槽”,主要工作原理为利用抛物面反射器“槽”将太阳光线聚焦到安装在焦点处的管子上,热量被收集在这些管内循环的传输流体中。1983—1990 年在莫哈韦沙漠三个地点建造的太阳能发电系统(SEGS)项目包括 9 个使用抛物槽式集热器的太阳能发电厂,如图 3-4 所示。

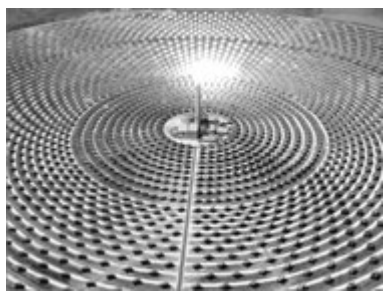


图 3-3 西班牙 Gema 太阳能项目的聚光太阳能“发电塔”



图 3-4 SEGS 项目采用镜槽收集太阳热量

无论这些 CSP 系统采用哪种集热器技术,最终收集的热量都会用以驱动蒸汽轮机,类似于传统发电站中使用的技术。此外,集热系统还可用于为建筑物提供太阳能热水和供暖。太阳能热板使用黑色集热器或真空管收集太阳的热量,然后通过水、空气或其他传输流体将热量分配到建筑物的热水或供暖系统。目前较为成熟且使用较广泛的是太阳能热水器。光热发电技术简单,初始投资低,但其缺点是不灵活,能量难以储存,浪费较多。



3.2.2 光伏发电

光伏发电是太阳能最主要的利用形式,它利用半导体界面的光伏效应将光能转化为电能。光伏发电早期主要是集中式的光伏电站,随着光伏组件的降价及电网升级,分布式的光伏电站大量涌现。光伏发电的主要缺点是光伏组件的成本较高,且制造光伏组件会对环境产生危害。随着光伏组件生产成本的下降,光伏发电效率得到提高,分布式的光伏发电以其发电过程中无震动、无噪声、无气液等污染物,且不用单独占用土地,可与建筑相结合安装于墙面或屋顶等优势,得到快速发展。

没有发电站真正产生能量,它只是将现有的能源转化为另一种形式。例如,我们从地球表面提取石油,以便汽车发动机将其化学能转化为动力;我们开采放射性同位素,以便核电站可以将原子能转化为热能,从而转化为电力。如图 3-5 所示,现在我们可以利用太阳能电池来收集阳光,将光能转化为电能。

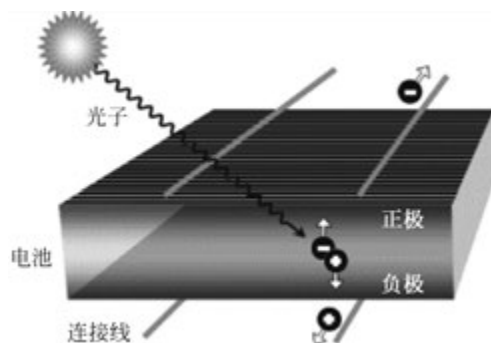


图 3-5 太阳能电池中的光伏效应

太阳能电池是太阳能发电系统的主要有源组件。它和其他子系统共同协作以调节和传输能量,有时还可以储存能量。当光的光子将能量传递给半导体材料中带负电的电子时,太阳能电池就会产生电力,让它们挣脱束缚,然后剩余的原子带有净正电荷。

在太阳能电池的工作过程中,负电荷被吸引到一个表面,正电荷被吸引到另一表面。太阳能电池正面和背面的导电网格就会聚集这些正电荷和负电荷。导电网格又连接到电线,以传导来自太阳能电池的直流电(DC),为外部电路供电。

综上所述,太阳能作为一次能源,具有总量丰富、无枯竭风险、清洁无污染及分布广、无须开采运输等优点。但太阳能还具有不稳定性,昼夜、季节和地理环境差异显著,其能量密度低、占地面积大,还易受到云、雾霾、沙尘暴等天气影响。基于太阳能的优缺点,其存在不同的利用方式,且规模和利用效率均不相同。

3.3 我国的太阳能资源分布

在简单了解目前太阳能资源的转换利用途径后,本节将简单介绍我国目前的太阳能资源分布情况。我国幅员广阔,太阳能资源储量十分丰富,每年到达地表的太阳辐射能约为 50×10^{15} MJ,各地太阳辐射总量为 $3350 \sim 8440 \text{ MJ/m}^2$,中值为 5860 MJ/m^2 。因跨越纬度

大、地形复杂,我国太阳能资源分布极不均匀,呈西北高、东南低的分布特征,表现为内陆高于沿海、高原高于平原、干燥区高于湿润区。由表 3-1 可见,我国太阳能资源辐射高值区为青藏高原与西北地区,年辐射总量可达 $6690\sim 8440\text{MJ}/\text{m}^2$ 。青藏高原地区辐射值最高,该区域总云量相对偏少,纬度低、海拔高,其年辐射均值超过 $7000\text{MJ}/\text{m}^2$ 。

按太阳能资源分级指标划分,我国太阳能资源极丰富区域包括西藏自治区西部、新疆维吾尔自治区东南部、甘肃省北部、宁夏回族自治区北部和青海省西部,最高值中心位于西藏自治区噶尔县,约为 $8440\text{MJ}/\text{m}^2$ 。太阳能资源丰富区域包括西藏自治区东南部和新疆维吾尔自治区西南部、甘肃省中部、青海省东部、宁夏回族自治区南部、河北省西北部、山西省北部、内蒙古自治区南部,年平均辐射总量为 $5852\sim 6690\text{MJ}/\text{m}^2$ 。太阳能资源较丰富区包括东北地区、山东省、河南省、河北省东南部、山西省南部、甘肃省南部、新疆维吾尔自治区北部、陕西省北部、广东省南部、福建省南部、江苏省北部、安徽省北部,年平均辐射总量为 $5016\sim 5852\text{MJ}/\text{m}^2$ 。长江中下游地区、福建省、浙江省和广东省的一部分地区年平均辐射总量为 $4180\sim 5016\text{MJ}/\text{m}^2$,是中国太阳能资源较贫乏区。因受空气湿度等因素影响,中国以四川盆地为中心,四川省东部、重庆市、贵州省北部、湖南省西北部等地是太阳能资源贫乏区,年平均辐射总量为 $3344\sim 4180\text{MJ}/\text{m}^2$,其中四川盆地是中国太阳能辐射值最低区域,仅约为 $3350\text{MJ}/\text{m}^2$ 。中国太阳能资源丰富区约占陆地面积的 22.8%,较丰富区占陆地面积的 44%,较贫乏区占陆地面积的 29.8%,其他区域占陆地面积的 3.3%。

表 3-1 我国太阳能资源分布特征

区域	年辐射总量/ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	年日照时数/ h	年有效日照 天数/d	主要分布区域
一类区域(极丰富区)	6690~8440	3200~3300	290~340	西藏自治区西部、甘肃省北部、宁夏回族自治区北部、新疆维吾尔自治区东南部和青海省西部
二类区域(丰富区)	5852~6690	3000~3200	260~290	西藏自治区东南部和新疆维吾尔自治区西南部、甘肃省中部、青海省东部、宁夏回族自治区南部、河北省西北部、山西省北部、内蒙古自治区南部
三类区域(较丰富区)	5016~5852	2200~3000	230~260	东北地区、山东省、河南省、河北省东南部、山西省南部、新疆维吾尔自治区北部、陕西省北部、甘肃省南部、广东省南部、福建省南部、江苏省北部和安徽省北部
四类区域(较贫乏区)	4180~5016	1400~2200	210~230	长江中下游地区、福建省、浙江省和广东省的一部分地区
五类区域(贫乏区)	3344~4180	1000~1400	170~210	四川省东部、重庆市、贵州省北部、湖南省西北部

中国年日照时数的分布大致以黑龙江省哈尔滨市至西藏自治区拉萨市的连线为界线分为东部和西部两部分。东部日照时间短且强度弱,分布也不均匀。黄河以北地区年日照时数在 2400h,而淮河以南的大部分地区年日照时数小于 2000h。四川盆地为年日照时数低值区,其中四川省都江堰年日照时数仅为 808h,为全国最低。西部日照时数普遍较长,年日照



时数均值为 3100h。年日照时数高值区域在西藏自治区西南部、内蒙古自治区西部、新疆维吾尔自治区东部、青海省北部和甘肃省北部,年日照时数均高于 3200h。

3.4 太阳能光伏发电的优势和问题

虽然太阳能光伏发电目前发展速度飞快,有望成为新能源发电的主导,但我们仍需客观地评价它的优势和问题。与化石能源、核能、风能和生物质能等发电技术相比,光伏发电具有一系列特有的优势,主要可归纳为如下几点:

(1) 发电原理具有先进性:它是直接从光子转换到电子,没有中间过程(如热能到机械能、机械能到电磁能转换等),发电形式极为简洁。因此,从理论上分析,可得到极高的发电效率,最高可达 80% 以上。

(2) 太阳能资源的无限和分布特性:太阳能辐射取之不尽、用之不竭,可再生并洁净环保;阳光普照大地,无处不在,无须运输,最重要的是绝无任何国家实施垄断和控制的可能。

(3) 没有资源短缺和耗尽问题,所用的主要材料硅储量丰富,为地壳上除氧之外排列第二多的元素。

(4) 光伏发电与自然的关系:没有燃烧过程,不排放温室气体和其他废气,不排放废水,环境友好,做到真正的绿色发电。

(5) 没有机械旋转部件,不存在机械磨损,无噪声。

(6) 建造和拆卸特性:采用模块化结构,易于建造、安装、拆卸、迁移,规模大小随意,而且易于随时扩大发电容量。

(7) 使用性能和寿命问题:数十年的应用实践证明,光伏发电性能稳定、可靠,使用寿命长(30 年以上)。

(8) 维护管理问题:可实现无人值守,维护成本低。

太阳能光伏发电虽然具有一系列特有的优势,但也存在着固有的缺点和问题:

(1) 太阳能资源的分散性。虽然到达地球表面的太阳辐射能的总量很大,但能流密度却很低,地面处的能流密度仅约为 $0.5\text{kW}/\text{m}^2$ 。

(2) 太阳能资源的间断性和不稳定性。太阳辐射能不仅随昼夜、季节、纬度和海拔等因素规律性变化,还会受天气影响而随机性变化。

(3) 效率低和成本高。虽然目前太阳能利用在某些方面理论上可行,技术也相对成熟,但其设备运行效率较低且成本偏高,所以经济性仍不能与常规能源相抗衡。

由于太阳能光伏发电的成本较高,目前在国内大规模推广应用还存在一定的困难。不过从长期来看,随着技术的进步以及其他能源利用形式的逐渐饱和,在 2050 年前后,太阳能将成为主流能源利用形式,有着不可估量的发展潜能。

3.5 光伏发电的原理与光伏并网体系架构

通过前面的章节我们了解到太阳能光伏发电技术是当代最具潜力的可再生能源技术之一,它通过将太阳辐射能转换为电能为我们提供一种清洁、无尽的能源供应方式。这项技术依赖于光伏效应,即当光线照射到特定的半导体材料上时,能够激发出电子从而产生电流。

为了更好地理解和应用这项技术,我们将探讨光伏发电的基本原理以及目前主流的应用架构、基本的拓扑结构和相应的控制原理。

1. 光伏发电的原理

光伏发电是基于半导体的光生伏特效应将太阳辐射能直接转换为电能。

光伏发电原理如图 3-6 所示。PN 结两侧因多数载流子(N^+ 区中的电子和 P 区中的空穴)向对方的扩散而形成宽度很窄的空间电荷区 W,建立自建电场 E_i 。它对两边多数载流子是势垒,阻挡其继续向对方扩散;但它对两边的少数载流子(N^+ 区中的空穴和 P 区中的电子)却有牵引作用,能把它迅速拉到对方区域。稳定平衡时,少数载流子极少,难以构成电流和输出电能。但是,当光伏电池受到太阳光子的冲击时,在光伏电池内部产生大量处于非平衡状态的电子-空穴对,其中的光生非平衡少数载流子(即 N^+ 区中的非平衡空穴和 P 区中的非平衡电子)可以被内建电场 E_i 牵引到对方区域,然后在光伏电池中的 PN 结中产生光生电场 E_{pv} ,当接通外电路时,即可流出电流,输出电能。把众多这样小的太阳能光伏电池单元通过串/并联的方式组合在一起,构成光伏电池组件,便会在太阳能的作用下输出功率足够大的电能。同光强度水平下,光伏组件提供的电流和电压取决于其外部电路和自身的物理特性。

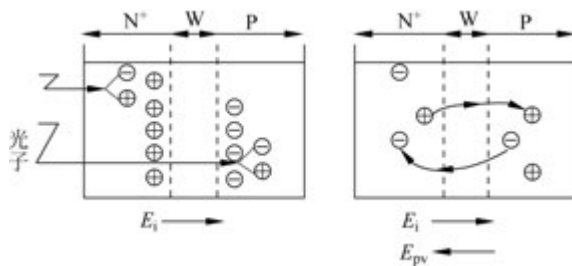


图 3-6 光伏发电原理

2. 光伏并网体系架构

光伏系统按其电力系统关系一般可分为离网光伏系统和光伏并网系统。离网光伏系统不与电力系统的电网相连,作为一种移动式电源,主要用于给边远无电地区供电。光伏并网系统一般与电力系统的电网连接,作为电力系统的一部分,可为电力系统提供有功和无功电能。现在,世界光伏发电系统的主流应用方式是光伏并网发电方式,即光伏系统通过并网逆变器与当地电网连接,通过电网对光伏系统所发的电能进行再分配,如供当地负载或进行电力调峰等。光伏并网系统通常由三部分构成:光伏阵列、逆变器和电网。

光伏阵列主要由光伏组件组成,其应用可以分为单个组件、组件串联及组件并联等。光伏电池阵列发出的直流电经过逆变器转化为符合要求的交流电后,直接或通过变压器接入电网。光伏系统一般由光伏电池板、控制器、储能器件、逆变器组成。图 3-7 为一个典型的光伏发电系统的结构图。

光伏并网发电系统按照其发电方式一般可分为集中式光伏并网发电系统与分布式光伏并网发电系统。

集中式光伏并网发电系统即光伏并网电站系统,系统所发电力直接进入电网,但这种方式不能完全发挥太阳能分布广泛、地域广阔等特点。



图 3-7 光伏发电系统结构

分布式光伏并网发电系统即户用型光伏并网系统，它可与建筑物结合形成屋顶光伏系统，通过设计可以降低建筑造价和光伏发电系统的造价。在分布式光伏并网发电系统中，白天不用的电量可以通过逆变器出售给当地的公用电力网，夜晚需要用电时再从电力网中购回。此外，光伏并网发电系统按照系统功能又可以分为两类：一类是不含蓄电池的“不可调度式光伏并网发电系统”；另一类是包含蓄电池组作为储能环节的“可调度式光伏并网发电系统”。

众所周知，光伏系统追求最大的发电功率输出，系统结构对发电功率有着直接的影响：一方面，光伏阵列的分布方式会对发电功率产生重要影响；另一方面，逆变器的结构也将随功率等级的不同而发生变化。因此，根据光伏阵列的不同分布以及功率等级可以把光伏并网发电系统体系结构分为 6 种：集中式、交流模块式、串型、多支路、主从和直流模块式。

(1) 集中式结构：如图 3-8 所示，就是将所有的光伏组件通过串/并联构成光伏阵列，并产生一个足够高的直流电压，然后通过一个并网逆变器集中将直流转换为交流并把能量输入电网。

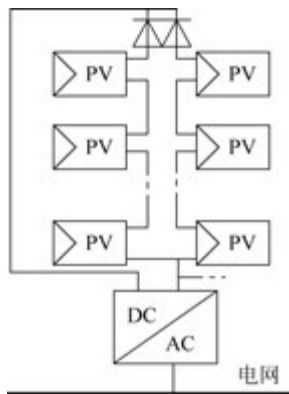


图 3-8 集中式结构

(2) 交流模块式结构 (module integrated converter, MIC)：最早由 Kleinkauf 教授于 20 世纪 80 年代提出，是把并网逆变器和光伏组件集成在一起作为一个光伏发电系统模块，如图 3-9 所示。

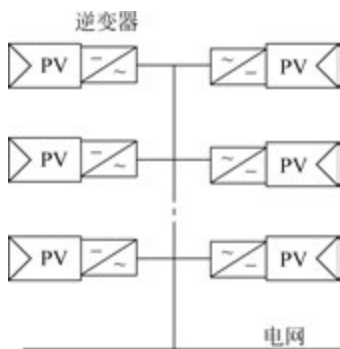


图 3-9 交流模块式结构

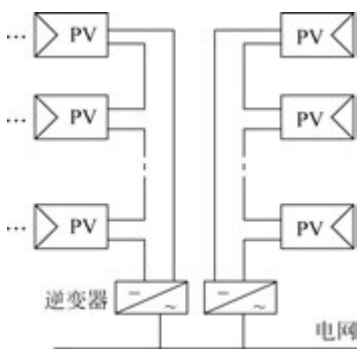


图 3-10 串型结构

(4) 多支路结构：是由多个 DC/DC 变换器、一个 DC/AC 逆变器构成。其综合了串型结构和集中式结构的优点，具体实现形式主要有两种：串联型多支路结构和并联型多支路

结构,分别如图 3-11 和图 3-12 所示。20 世纪 90 年代后期多支路结构被大量采用,该结构提高了光伏并网发电系统的功率,降低了系统单位功率的成本,提高了系统的灵活性,已成为光伏并网系统结构的主要发展趋势。

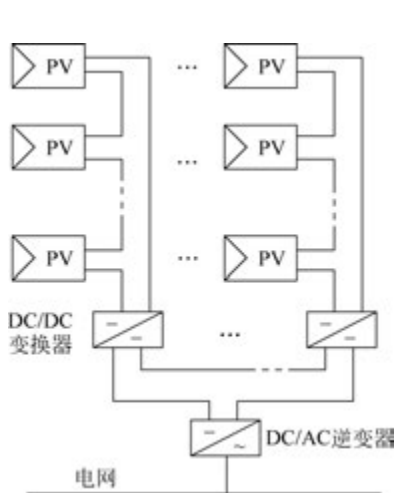


图 3-11 串联型多支路结构

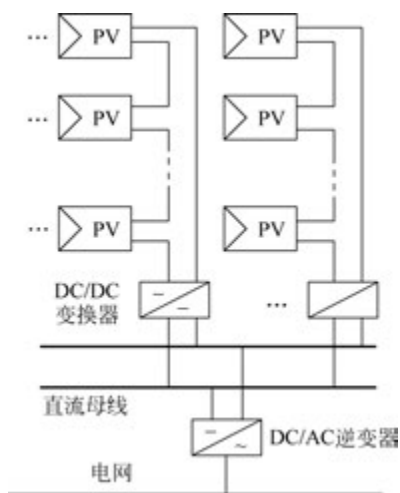


图 3-12 并联型多支路结构

(5) 主从结构：是一种新型的光伏并网发电系统体系结构,如图 3-13 所示,也是光伏并网发电系统结构发展的趋势。它通过控制组协同开关来动态地决定在不同的外部环境下光伏并网系统的结构,以期达到最佳的光伏能量利用效率。

(6) 直流模块式结构：将并联型多支路结构与交流模块式结构相结合,有学者提出了直流模块式结构。直流模块式结构由光伏直流建筑模块和集中逆变模块构成,如图 3-14 所示。光伏直流建筑模块是将光伏组件、高增益 DC/DC 变换器和表面建筑材料通过合理的设计集成为一体,构成具有光伏发电功能的、独立的、即插即用的表面建筑元件。集中逆变模块的主要功能是将大量并联在公共直流母线上的光伏直流建筑模块发出的直流电能逆变为交流电能且实现并网功能,同时控制直流母线电压恒定,保证各个光伏直流建筑模块正常并联运行。

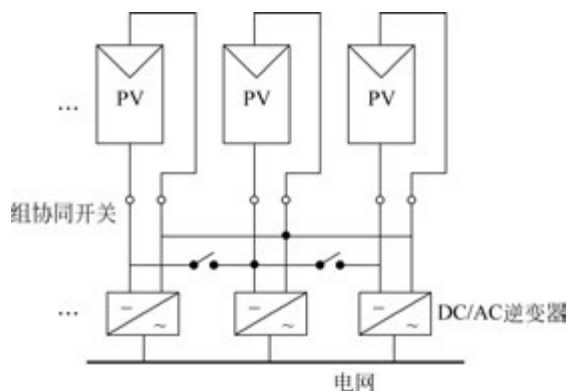


图 3-13 主从结构

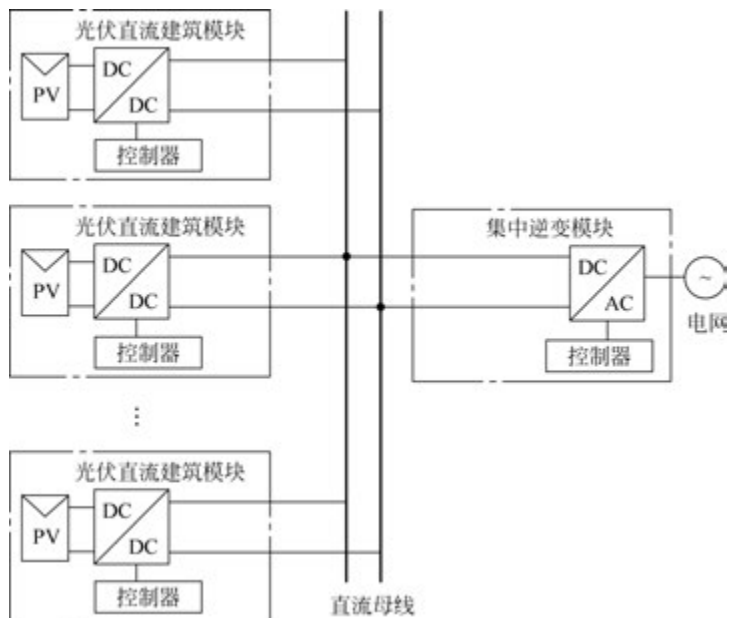


图 3-14 直流模块式结构

3.6 光伏并网逆变器拓扑介绍

光伏并网逆变器是将太阳能电池输出的直流电转换成符合电网要求的交流电再输入电网的设备,是光伏并网发电系统能量转换与控制的核心。光伏并网逆变器的性能不仅影响和决定整个光伏并网发电系统能否稳定、安全、可靠、高效地运行,还主要影响整个系统的使用寿命。因此,掌握光伏并网逆变器技术对应用和推广光伏并网发电系统有着至关重要的作用。根据有无隔离变压器,光伏并网逆变器可分为隔离型和非隔离型等。

3.6.1 隔离型光伏并网逆变器

在隔离型光伏并网逆变器中,又可以根据隔离变压器的工作频率将其分为工频隔离型和高频隔离型两类。

1. 工频隔离型光伏并网逆变器

工频隔离型是光伏并网逆变器最常用的结构,也是目前市场上使用最多的光伏逆变器类型,其结构原理如图 3-15 所示。光伏阵列发出的直流电能通过逆变器转化为 50Hz 的交流电能,再经过工频变压器输入电网,该工频变压器同时完成电压匹配与隔离功能。由于工频隔离型光伏并网逆变器采用了工频变压器使输入与输出隔离,主电路和控制电路相对简单,而且光伏阵列直流输入电压的匹配范围较大。

变压器的隔离,一方面可以有效地防止人接触到光伏侧的正极或者负极时电网电流通过桥臂形成回路对人体造成伤害的可能性,提高了系统的安全性;另一方面保证了系统不会向电网注入直流分量,有效地防止了配电变压器的饱和。

然而,工频变压器具有体积大、重量重的缺点,它约占逆变器总重量的 50%,使得逆变



图 3-15 工频隔离型光伏并网逆变器结构原理

器外形尺寸难以减小。另外,工频变压器的存在还增加了系统损耗、成本,且增加了运输、安装的难度。

工频隔离型光伏并网逆变器常规的拓扑形式有单相结构、三相结构以及三相多重结构等。我们以单相结构为例进行简单介绍,单相结构的工频隔离型光伏并网逆变器如图 3-16 所示,一般可采用全桥和半桥结构。这类单相结构常用于几千瓦以下功率等级的光伏并网系统,其中直流工作电压一般小于 600V,工作效率也小于 96%。

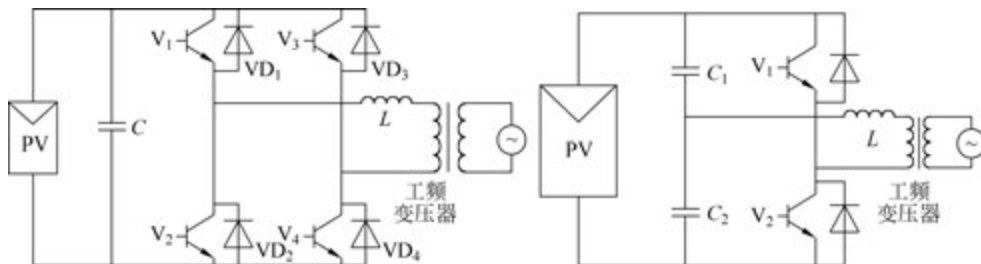


图 3-16 单相结构的工频隔离系统

工频隔离型光伏并网逆变器是最早发展和应用的一种光伏并网逆变器主电路形式,随着逆变技术的发展,在保留隔离型光伏并网逆变器优点的基础上,为减小逆变器的体积和质量,高频隔离型光伏并网逆变器便应运而生。

2. 高频隔离型光伏并网逆变器

高频隔离型光伏并网逆变器与工频隔离型光伏并网逆变器的不同之处在于使用了高频变压器,从而具有较小的体积和重量,克服了工频隔离型光伏并网逆变器的主要缺点。值得一提的是,随着器件和控制技术的改进,高频隔离型光伏并网逆变器的效率也可以做得很高。

按电路拓扑结构来分类,高频隔离型光伏并网逆变器主要有两种类型:DC/DC 变换型和周波变换型,分别如图 3-17 和图 3-18 所示。

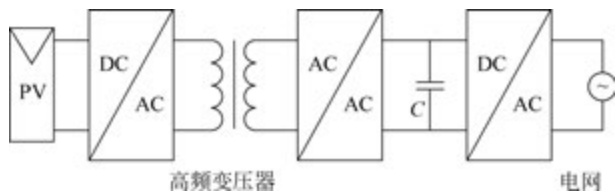


图 3-17 DC/DC 变换型高频隔离系统

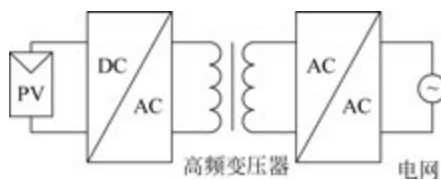


图 3-18 周波变换型高频隔离系统



在具体的电路结构上,DC/DC 变换型高频链光伏并网逆变器前级的高频逆变器部分可采用推挽式、半桥式和全桥式等变换电路的形式,而后级的逆变器部分可采用半桥式和全桥式等变换电路的形式。一般而言,推挽式变换电路适用于低压输入变换场合;半桥式和全桥式变换电路适用于高压输入场合。实际应用中可根据最终输出的电压等级及功率大小确定合适的电路拓扑形式。

全桥式 DC/DC 变换型高频链光伏并网逆变器的电路拓扑结构如图 3-19 所示。全桥式 DC/DC 变换型高频链光伏并网逆变器由一个高频电压型全桥逆变器、一个高频变压器、一个不可控桥式二极管全波整流器、一个直流滤波电感和一个极性反转逆变桥组成。其中,高频电压型全桥逆变器采用正弦脉宽调制 (SPWPM) 方式,将光伏阵列发出的直流电压逆变成双极性三电平 SPWPM 高频脉冲信号。高频变压器将该信号升压后传输给后级不可控桥式二极管全波整流电路; SPWPM 脉冲信号在此整流,经直流滤波电感滤波后,变换成半正弦波形;最后由极性反转逆变桥将半正弦波反转为工频的正弦全波,并将电能馈入工频电网。

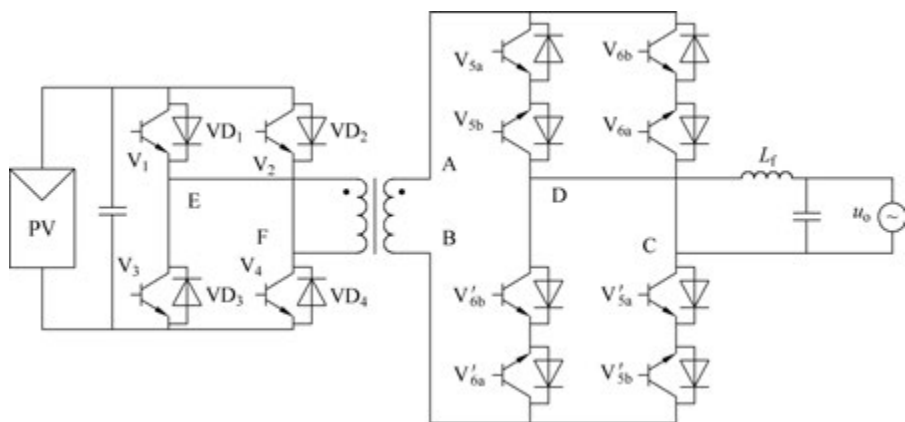


图 3-19 全桥式 DC/DC 变换型高频链光伏并网逆变器拓扑结构

在具体的电路结构上,周波变换型高频链光伏并网逆变器的高频逆变器部分可采用推挽式、半桥式和全桥式等变换电路的形式,周波变换器部分可采用全桥式和全波式等变换电路的形式。一般而言,推挽式变换电路适用于低压输入变换场合;半桥式和全桥式变换电路适用于高压输入场合;全波式变换电路功率开关电压应力高,功率开关数少,变压器绕组的利用率低,适用于低压输出变换场合;全桥式变换电路功率开关电压应力低,功率开关数多,变压器绕组的利用率高,适用于高压输出场合。全桥式周波变换型高频链光伏并网逆变器的拓扑结构如图 3-20 所示。

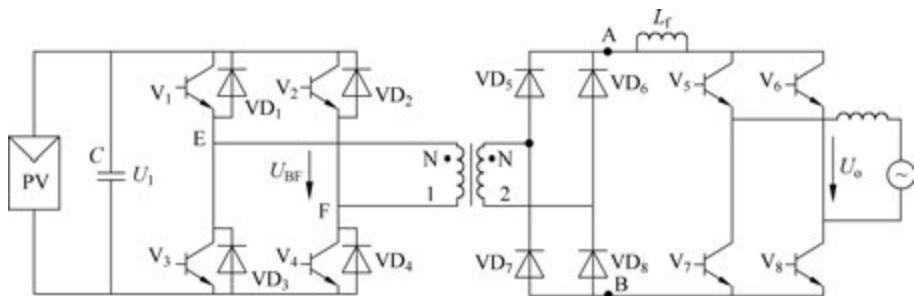


图 3-20 全桥式周波变换型高频链光伏并网逆变器拓扑结构

在隔离型并网系统中,变压器将电能转化成磁能,再将磁能转化成电能,显然这一过程将导致能量损耗。一般数千瓦的小容量变压器导致的能量损失可达 5%,甚至更高。因此,提高光伏并网系统效率的有效手段便是采用无变压器的非隔离型光伏并网逆变器结构。而在非隔离型系统中,由于省去了笨重的工频变压器或复杂的高频变压器,系统结构变简单、质量变轻、成本降低,具有相对较高的效率。

3.6.2 非隔离型光伏并网逆变器

非隔离型光伏并网逆变器按拓扑结构可以分为单级和多级两类。

1. 单级非隔离型光伏并网逆变器

在图 3-21 所示的单级非隔离型光伏并网逆变器系统中,光伏阵列通过逆变器直接耦合并网,因而逆变器工作在工频模式。另外,为了使直流侧电压达到能够直接并网逆变的电压等级,一般要求光伏阵列具有较高的输出电压,这便使得光伏组件乃至整个系统必须具有较高的绝缘等级,否则容易出现漏电现象。单级非隔离型光伏并网逆变器只用一级能量变换就可以完成 DC/AC 并网逆变功能,它具有电路简单、元器件少、可靠性高、效率高、功耗低等诸多优点。

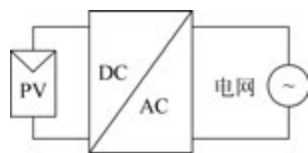


图 3-21 单级非隔离型光伏并网逆变器系统

实际上,当光伏阵列的输出电压满足并网逆变要求且不需要隔离时,可以将工频隔离型光伏并网逆变器各种拓扑结构中的隔离变压器省略,从而演变出单级非隔离型光伏并网逆变器的各种拓扑结构,如全桥式、半桥式、三电平式等。为了克服常规结构的单级非隔离型光伏并网逆变器的不足,进一步减小光伏并网逆变器的重量、体积,有关专家提出了一种基于 Buck-Boost 电路的单级非隔离型光伏并网逆变器,其拓扑结构如图 3-22 所示。

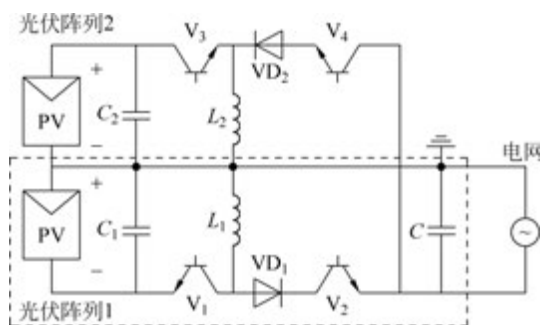


图 3-22 基于 Buck-Boost 电路的单级非隔离型光伏并网逆变器主电路拓扑结构

这种基于 Buck-Boost 电路的单级非隔离型光伏并网逆变器拓扑由两组光伏阵列和 Buck-Boost 型斩波器组成。由于它采用 Buck-Boost 型斩波器,因此无须配置变压器便能适配较宽的光伏阵列电压以满足并网发电要求。两个 Buck-Boost 型斩波器工作在固定开关频率的电流不连续状态(discontinuous current mode, DCM)下,并且在工频电网的正负半周中控制两组光伏阵列交替工作。由于中间储能电感的存在,这种非隔离型光伏并网逆变器的输出交流端无须接入流过工频电流的电感,因此逆变器的体积、重量减小。另外,与具有直流电压适配能力的多级非隔离型光伏并网逆变器相比,这种逆变系统所用开关器件的



数目相对较少。

2. 多级非隔离型光伏并网逆变器

在图 3-23 所示的多级非隔离型光伏并网逆变器系统中,功率变换部分一般由 DC/DC 和 DC/AC 多级变换器级联组成。由于在该类拓扑结构中一般要采用高频变换技术,因此也称为高频非隔离型光伏并网逆变器。

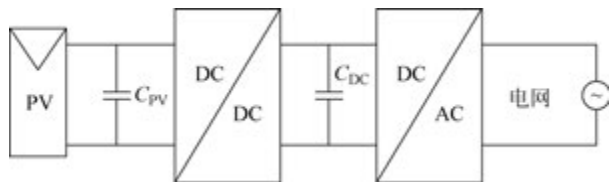


图 3-23 多级非隔离型光伏并网逆变器系统

基本 Boost 的多级非隔离型光伏并网逆变器的主电路拓扑结构如图 3-24 所示。该电路为双级功率变换电路:前级采用 Boost 变换器完成直流侧光伏阵列输出电压的升压功能以及系统的最大功率输出点跟踪(maximum power point tracking, MPPT), 后级 DC/AC 部分一般采用经典的全桥逆变电路完成系统的并网逆变功能。

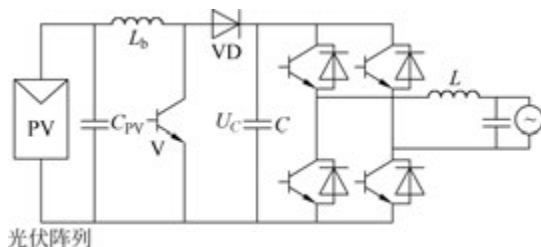


图 3-24 基本 Boost 的多级非隔离型光伏并网逆变器主电路拓扑结构

需要注意的是,由于在非隔离型光伏并网系统中光伏阵列与公共电网是不隔离的,这将导致光伏组件与电网电压直接连接,而大面积的太阳能电池组不可避免地与地之间存在较大的分布电容,因此会产生太阳能电池对地的共模漏电流。而且由于该系统无工频隔离变压器,该系统容易向电网注入直流分量。

实际上,对于非隔离型光伏并网系统,只要采取适当措施,同样可保证主电路和控制电路运行的安全性。另外,由于非隔离型光伏并网逆变器具有体积小、重量小、效率高、成本较低等优点,其将成为今后主要的光伏并网逆变器结构。

3.7 最大功率输出点跟踪控制原理

由于光伏电池的输出电压和输出电流随着日照强度和电池结温的变化具有强烈的非线性,因此在特定的工作环境下存在着一个唯一的最大功率输出点(MPP)。在实际的应用系统中自然光的辐射强度及大气的透光率均处于动态变化中,为了在同样的日照强度和电池结温下获得尽可能多的电能,就存在着一个最大功率输出点跟踪(MPPT)的问题。

本节按照控制理论的出发点以及 MPPT 控制方法的发展过程,对常用的 MPPT 控制

方法进行了分类总结并分析比较了各种方法的优缺点。

光伏电池是一种非线性的直流源,图 3-25 和图 3-26 分别给出了不同光照强度和不同电池结温下光伏阵列输出的特性曲线。由图 3-25 和图 3-26 可知,当外界自然条件改变时,光伏阵列的输出特性将随之改变,其输出功率及最大功率点亦相应改变。并且,光照强度变化主要影响阵列输出电流,而电池结温变化主要影响输出电压。当光伏阵列的工作电压位于最大功率点电压 U_{MPP} 时,光伏阵列就输出最大功率 P_{MPP} 。

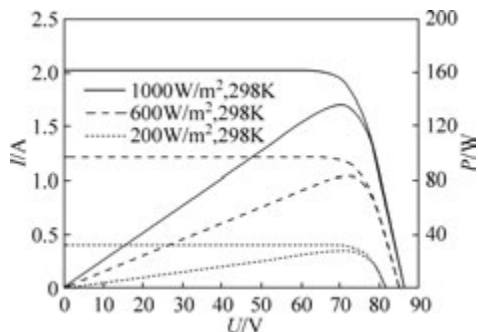


图 3-25 不同光照强度下光伏阵列的输出特性

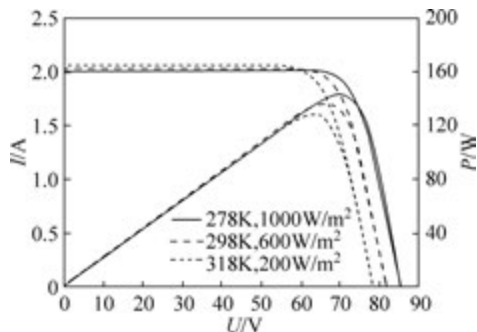


图 3-26 不同电池结温下光伏阵列的输出特性

早期对光伏阵列 MPPT 技术的研究主要应用定电压跟踪(constant voltage tracking, CVT)法、光伏阵列组合法以及实际测量法。

1. CVT 法

CVT 法是一种简化的最大功率输出点跟踪方法,这种方法实际上是一种稳压控制,但是由于它忽略了温度对阵列输出电压的影响,其实质并不是真正的最大功率输出点跟踪。对于四季温差或日温差比较大的地区, CVT 法并不能在所有的温度环境下完全跟踪最大功率。

硅太阳能电池阵列具有如图 3-27 所示的伏安特性,在不同的日射强度下它与负载特性 L 的交点,如 a, b, c, d, e 等,为系统当前的工作点。可以看出,这些工作点并不正好落在阵列可能提供最大功率的那些点,如 a', b', c', d', e' 上,这就不能充分利用在当前日射下阵列所能提供的最大功率,被浪费的阵列容量为图 3-27 中的阴影部分。如果把在不同日射下阵列所能提供的最大功率输出点连起来,就构成了图 3-27 中曲线 P_{max} 所示的最大功率点轨迹线,任何时候都应设法使系统的工作点落在这一

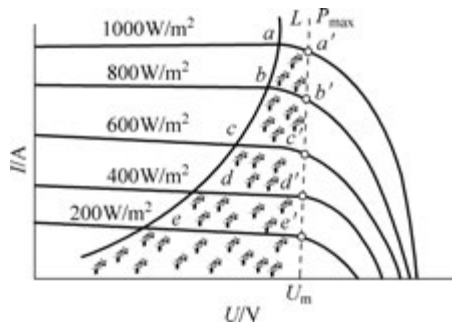


图 3-27 太阳能电池阵列的伏安特性及其工作点

轨迹线上,从电路匹配的角度看,这就需要一个阻抗变换器。为了实现这一阻抗变换,即实现把 a, b, c, d, e 等工作点移到 a', b', c', d', e' 等点上,当温度一定时,不同光照强度下太阳能电池板的最大功率输出点几乎落在同一根垂直线的两侧邻近。这种情况下,可以近似地将最大功率输出点的轨迹线看作电压 U 为常数(即 $U = \text{const}$)的一根垂直线。因此,通过控制光伏阵列的输出电压,使其保持在这个固定的电压值上,就可以使光伏



电池工作在最大功率输出点附近,从而最大化地利用太阳能,亦即只要保持阵列的输出端电压为常数且等于某一日射强度下相应最大功率输出点的电压,就可以大致保证阵列输出在该温度下的最大功率,把最大功率输出点跟踪器简化为一个稳压器,这就是 CVT 法的理论依据。

采用 CVT 法较之不带阻抗变换器的直接耦合要有利得多,对于一般光伏水泵系统可望多获得高至 20% 的扬水,但是这种跟踪方式忽略了温度对阵列开路电压的影响。一般硅太阳能电池的开路电压在较大程度上受结温影响,对结温影响最大的因素当推环境温度和太阳辐照度。以常规单晶硅太阳能电池为例,环境温度每升高 1°C ,其开路电压下降率为 $0.35\%\sim 0.45\%$,具体较准确的值可由实验测得,也可用所选太阳能电池的数字模型计算得到。

2. 光伏阵列组合法

光伏阵列组合法是较早提出的一种方法。这种方法是针对不同的负载来调节光伏阵列串并联的个数,从而使光伏阵列满足不同的负载要求并工作在最大功率输出点上。但是这种方法存在致命的缺点:它的实时性很差,不能在外界环境变化时及时地改变光伏阵列的工作点。

3. 实际测量法

实际测量法是用额外的光伏阵列模组建立光伏阵列在一定日照量及温度时的参考模型。这种方法的优点是可以避免因光伏电池的老化而失去准确度,但是这种方法对于小功率系统而言成本太高,对于大功率系统则需要考虑多重最大值的问题。

在更为广泛的意义上,研究光伏材料以及光伏阵列最大功率的机械式跟踪方法也是获得光伏阵列更高转换效率的方法,研究人员在这两方面一直都在努力。

在回顾了光伏发电的基本原理以及其目前主流的应用架构、基本的拓扑结构和相应的 MPPT 控制原理之后,我们可以看到各种类型的光伏系统都在为适应不同的应用场景和提高能量转换效率而不断进步。随着研发的深入和技术的成熟,光伏发电的成本正在逐步降低,其在全球能源市场中的竞争力不断增强。展望未来,光伏发电将继续在替代能源领域扮演关键角色,推动能源产业的绿色转型,并有望实现全球能源结构的优化与可持续发展。

3.8 光伏发电的发展历程

太阳能光伏发电,作为一种采集和利用太阳光的方式,拥有悠久的历史 and 光明的未来。自从 19 世纪末第一次发现光伏效应以来,光伏发电技术经历了从实验室研究到商业应用,再到全球能源行业重要组成部分的转变。随着全球对可持续、清洁能源的需求不断增长,光伏产业迅速扩张,技术创新持续推进,使光伏发电成为解决能源和环境问题的重要途径。本节将简单探究光伏发电的发展现状,展望其未来趋势,并对比国内外光伏产业的不同发展面貌。

3.8.1 光伏发电的发展现状

1. 国外光伏发电的发展现状

光伏电池是太阳能光伏发电系统的基本核心部件,它的大规模应用需要解决两大难题:一是提高光电转换效率;二是降低生产成本。

以硅片为基础的第一代光伏电池,其技术虽已经发展成熟,但高昂的材料成本在全部生产成本中占据主导地位,不仅消耗了过多硅材料,而且制作全过程中要消耗很多能源。基于

薄膜技术的第二代光伏电池中,很薄的光电材料被铺在非硅材料的衬底上,大大减少了半导体材料的消耗,并且易于形成批量自动化生产,从而大大降低了光伏电池的成本。国际上已经开发出电池效率在 15% 以上、组件效率在 10% 以上和系统效率在 8% 以上、使用寿命超过 15 年的薄膜电池工业化生产技术。第三代高转换效率的薄膜光伏电池通过减少非光能耗,增加光子有效利用以及减小光伏电池内阻,使得光伏转换效率的上限有望获得新的提升。

根据国际能源署(IEA)的数据,全球光伏装机容量在过去十年中呈现出显著增长的状态。截至 2024 年,全球累计光伏发电装机容量突破 2000GW,其中中国、美国、欧洲和印度是最大的市场。此外,光伏电价的下降也是不争的事实,根据国际可再生能源机构(IRENA)的报告,全球平均光伏电价从 2010 年的 0.35 美元/(kW·h)降至 2020 年的 0.08 美元/(kW·h),降幅超过 75%。

技术进步方面,太阳能电池的效率不断提高。例如,晶硅电池的转换效率已经超过了 25%,而新兴的钙钛矿电池等技术则有望将效率提升至更高水平。同时,储能技术的发展也不容忽视。

政策推动方面,多个国家和地区设定了清晰的可再生能源目标。如欧盟计划到 2030 年,可再生能源在总能源消费中的占比达到至少 32%。美国各州也有不同的激励政策,如加州设定了 2045 年实现 100% 清洁电力的目标。

环境意识提升方面,全球对气候变化问题的关注在近年来显著提升,这促进了对光伏等清洁能源的需求。

企业竞争方面,特斯拉、First Solar、Suntech 等传统和新兴光伏企业的竞争激烈,这些企业在技术创新和成本控制上不断取得突破。

2. 我国光伏发电技术的现状

我国于 1958 年开始研究太阳能电池,太阳能电池于 1971 年首次成功应用于自主发射的实践一号卫星上,1973 年太阳能电池开始用于地面工程。我国的光伏工业在 20 世纪 80 年代以前尚处于雏形,太阳能电池的年产量一直徘徊在 10kW 以下,价格也很高昂。20 世纪 80 年代以后,国家开始对光伏工业和光伏市场的发展给予支持,中央和地方政府在光伏领域投入了一定资金,使得我国十分弱小的太阳能电池工业得到了巩固并在许多应用领域建立了示范,如微波中继站、部队通信系统、水闸和石油管道的阴极保护系统、农村载波电话系统、小型户用系统和村庄供电系统以及并网发电系统等。

近二十余年,我国在光伏发电技术研发方面先后开展了晶体硅高效电池、非晶硅薄膜电池、碲化镉和铜铟硒薄膜电池、多晶硅薄膜电池及应用系统关键技术的研究。特别是“十五”期间,国家通过科技攻关和“863”计划安排支持了一批增强现有装备生产能力的项目,大幅度提高了光伏发电技术和产业的水平,缩短了光伏发电制造业与国际水平的差距。中国国家能源局的数据显示,截至 2025 年年底,中国的光伏发电装机容量达 12 亿 kW,连续多年位居世界第一。

技术进步与创新方面,中国光伏企业在发射极和背面钝化电池(passivated emitter and rear cell, PERC)技术上取得了领先,部分企业的电池效率已经达到了 24% 以上。同时,中国多晶硅生产领域也占据全球领先地位,根据中国有色金属工业协会的数据,中国多晶硅产量占全球的比例超过 70%。



产业链完善方面,中国形成了从硅料、硅片、电池片到组件制造的完整产业链,拥有全球最完整的光伏供应链体系。

消纳问题方面,国家能源局表示,将通过提高跨区通道能力、优化电网调度等措施,改善光伏发电的消纳情况。

出口市场方面,根据中国海关的数据,2025 年中国光伏产品(含硅片、电池、组件、逆变器等)的出口总额约为 2817 亿元人民币(约合 400 亿美元)。

产能过剩风险方面,中国光伏行业协会警告,部分环节存在产能过剩的风险,这可能导致价格竞争加剧和行业整合。

环境与可持续性方面,中国政府强调了废旧光伏组件回收利用的重要性,并开始制定相关政策和标准以推动行业的可持续发展。

3.8.2 光伏发电的发展趋势

1. 世界光伏产业的发展趋势

随着光伏行业的迅速发展,全球太阳能电池产量不断扩大,国外太阳能电池发展现状呈现出积极的发展态势。

1999 年以前,美国的太阳能光伏发电研究和开发一直处于世界领先地位,后来由于种种原因,太阳能电池组件的产量落后于日本和欧洲。美国在 2004 年 9 月发表了“我们的太阳电力的未来: 2030 年及更久远的美国光伏工业路线图”,对此进行了分析,提出要恢复美国在光伏市场的领导地位。为此,要采取税收优惠、提高上网电价、增加政府及当地投入以及在 2010 年以前每年投入 2.5 亿美元用于研发等措施,并提出以下目标: 到 2030 年,美国新增发电容量的一半由太阳能发电提供。2003 年美国安装的太阳能电池组件容量不到 0.4GW,在 2010 年前美国的年增长率为 30%~38%,2010—2020 年年增长率为 26%,到 2020 年累计安装太阳能电池组件容量 36GW,到 2030 年累计安装太阳能电池组件容量将达到 200GW。2030 年,美国太阳能发电量将达到 3600 亿 kW·h,足够 3400 万户家庭使用,届时太阳能电力将成为重要的电力来源。SEIA 和 GTMRResearch 发布的年度回顾报告显示,2015 年美国住宅太阳能系统价格跌至 3.5 美元/(kW·h),公用事业固定式太阳能价格跌幅最大,跌至 1.33 美元/(kW·h)。如有政府的政策支持,太阳能发电的电价可低于 5.7 美分/(kW·h)。美国太阳能电池板产能已经超过 31GW,这一数字自 2022 年《通胀削减法案》生效以来增长了近 4 倍。这一增长得益于联邦清洁能源政策的推动,包括太阳能和储能行业的多项激励措施和技术进步,迅速创造就业机会,推动全美 50 州(尤其是亚利桑那州、内华达州和佐治亚州)的经济增长。此外,美国太阳能电池板的总装机容量预计将在未来几年内继续增长,到 2029 年预计将翻一番,达到 440GW。

日本新能源和工业技术发展组织(NEDO)在 2004 年 6 月发表的“面向 2030 年光伏路线图的概述”中提出: 到 2030 年累计安装太阳能电池组件容量要达到 1000GW,届时日本所有住宅所消费的电力中将有 50%由太阳能光伏发电提供,大约占全部电力供应的 10%。

欧洲在 2010 年前太阳能发电市场平均年增长率为 27%,2010—2020 年年增长率为 34%,2020—2040 年年增长率预计为 15%。在 2010 年太阳能发电提供的电力占总发电量的 1%,预计到 2040 年将占总发电量的 26%。

表 3-2 是美国、日本和欧洲制订的光伏发展计划。

表 3-2 美国、日本和欧洲制订的光伏发展计划

国家和地区	光伏发电装机容量/GW			
	2005 年	2010 年	2020 年	2030 年
美国	1.0	2.1	36	200
日本	1.5	4.8	30	205
欧洲	2.1	3.0	41	200
世界	5.45	12	125	920

国际光伏应用中并网发电和光伏建筑集成发展迅速,已成为光伏市场的最大份额。它标志着光伏发电由边远地区和特殊应用正在向城市过渡,由补充能源向替代能源过渡,由大型集中电站向分布式供电模式过渡。

2. 我国光伏产业的发展趋势

中国在全球太阳能电池产量中占据重要地位。近年来,得益于我国积极推行的鼓励新能源发展的优惠政策,太阳能电池产业展现出强劲的增长势头。

1997 年,提出“中国光明工程”,利用太阳能作为全国扶贫工作之一。该工程旨在利用太阳能资源,改善偏远地区的电力供应和贫困状况。此举开启了中国光伏产业的大门。

2002 年,发布“送电到乡工程”,揭开分布式光伏发电的序幕。该工程旨在为偏远地区提供可靠的电力供应,通过建设分布式光伏系统,实现了“送电到乡”的目标。此举促进了我国光伏产业的发展。

2005 年 2 月 28 日,通过《中华人民共和国可再生能源法》,该法自 2006 年 1 月 1 日起施行。该法规定了光伏发电等可再生能源的开发、利用和管理的相关事项,为光伏产业提供了法律保障。

2009 年,国家出台了一系列财政补贴措施以促进光伏产业的发展,主要体现在两个方面:第一,启动太阳能屋顶计划。2009 年 3 月,财政部与住房和城乡建设部联合颁布了《太阳能光电建筑实施意见》,强调在可再生能源专项资金中,中央财政可以安排部分资金用于支持太阳能光伏应用在城乡建筑领域的示范与推广,是促进光伏屋顶计划与 BIPV 应用的补贴计划,也是我国光伏市场的重要转折点。同年 9 月下达第一批项目,中央财政的预算安排为 12.7 亿元人民币,正式启动国内太阳能屋顶计划。第二,金太阳示范工程。2009 年 7 月,发布《关于实施金太阳示范工程的通知》,对并网光伏发电项目,原则上按光伏发电系统及其配套输配电工程总投资的 50% 给予补助,偏远无电地区的独立光伏发电系统按 70% 补助,太阳能光伏产业基础能力建设与光伏发电关键技术的产业化项目予以适当的补助或者贴息。同时,光伏发电成本也得到了大幅度的降低。这些政策的出台,为光伏发电的推广应用奠定了基础。

2013 年,我国光伏发电装机容量达到了 90 万 kW,成为全球最大的光伏发电市场。同时,光伏发电成本继续下降,让光伏发电变得更加经济实惠。

2019 年,光伏产业进入“新基建”时代,成为产业发展的新动力。随着国家对新型基础设施建设的重视,光伏产业在新能源领域的基础设施建设中的作用日益凸显,成为推动产业发展的重要力量。中国光伏行业协会数据显示,2017—2023 年中国太阳能电池产量整体呈现逐年增加的趋势,年复合增长率为 33.75%。2024 年全国太阳能电池产量增长至



68495.3 万 kW。从我国主要省市太阳能电池产量占比来看,排名靠前的省份主要为江苏省和浙江省,其产量占比合计超半数。

我国有丰富的太阳能资源以及潜在的巨大市场,经过 20 多年的艰苦努力,已经为太阳能光伏发电更大发展和更大规模应用奠定了良好基础,但要实现完全商业化的目的,还要消除制约发展的一些障碍。中国太阳能光伏技术处于发展的初期阶段,大多光伏组件厂家规模小,基础设施和生产设备落后,产品质量总体水平比国外产品低,生产成本却相对较高。此外,缺乏统一的设计和建设规范,将无法保证光伏电站和系统的建设质量,影响光伏发电的进一步推广。稳定且不断发展的市场和强有力的政府支持是光伏电池研发的根本动力。目前,我国正在继续培育国内的光伏市场,如开展“送电到村”项目,加大城市屋顶和沙漠并网电站的研发和示范投入等;同时注重人才培养,紧抓技术平台和队伍的建设,积极研发新型电池生产和应用技术,努力降低成本,并从税收、信贷等方面扶植光伏产业。

3.9 中国光伏产业发展现状:挑战与对策

如前文所述,中国新能源产业的战略定位或使命不应仅限于拉动经济增长、创造就业,更应着眼于借新能源领域的技术研发促进中国经济的“创新驱动、转型发展”,并且对中国新能源战略起到支撑、配合作用。一方面,新能源产业将承担为中国新能源战略实施提供价格适宜、质量可靠的新能源产品的任务;另一方面,新能源战略实施将促进新能源等低碳产业的发展,有利于提升中国在未来低碳经济时代的产业竞争力。不过,中国新能源产业发展存在重“量”轻“质”的问题,难以承担起前述使命,需要采取若干政策举措来纠正这一现象。

3.9.1 我国光伏产业现状

我国光伏产业起步较西方国家略晚,早期主要为太阳能电池制造并出口美国和欧盟;自 2013 年起,在政府政策的大力扶持下,凭借产业配套和人力资源优势,通过自主创新与引进消化吸收再创新的发展模式,逐步形成了自有的产业技术体系,成为具有国际竞争优势的战略性新兴产业。伴随着国内光伏产业技术的快速进步和产业链条的逐步完整,中国的光伏市场装机容量呈现持续快速增长态势,至 2017 年,中国光伏在各环节的产业规模占全球比重均超过 50%,占据全球的核心地位。2018 年“5·31”新政发布后,政府扶持的力度大幅削减,中国光伏市场在阶段性阵痛中以“降本增效”为核心发展理念,催生了技术和工艺在更高层级的更新迭代。2020 年 12 月 11 日,中国光伏行业协会向外界公布基于“双碳”目标下的“十四五”光伏装机需求分析,一般预计国内年均光伏新增装机容量是 70GW,乐观预计国内年均光伏新增装机容量是 90GW。“双碳”目标的提出为光伏产业的发展奠定了新的发展目标和纲领,中国光伏将在未来成为全球可再生能源发电的支柱型产业。从能源结构看,能源结构的清洁化将是实现碳达峰、碳中和的重要路径。可再生能源将在中国能源结构清洁化转型中扮演关键角色,光伏在可再生能源中又是重中之重。

2023 年,我国光伏产业规模持续扩大,多晶硅、硅片、电池、组件等主要制造环节产量同比增长均超过 64%,行业总产值超过 1.75 万亿元;光伏新增装机容量达 216.88GW,同比增长 148.1%。其中受大型风电光伏发电基地建设等拉动,集中式光伏新增装机容量超过 110GW,占比超过 50%,反超分布式光伏;光伏产品出口方面,硅片出口 70.3GW,同比增长超

过 93.6%；电池出口 39.3GW，同比增长 65.5%；组件出口 211.7GW，同比增长 37.9%。

2024 年 9 月 20 日，全球装机容量最大的熔盐“线性菲涅尔”新能源光热电站——甘肃玉门 10 万 kW 光热电站并网发电。甘肃玉门 10 万 kW 光热电站位于玉门市花海镇的戈壁滩上。项目利用太阳能集热的面积达到 130 万 m^2 ，使用熔盐作为吸收和储藏太阳能热量的介质，配置了 8h 熔盐储热系统。10 万 kW 光热电站项目并网后，将和已经建成的 40 万 kW 光伏发电项目、20 万 kW 风力发电项目和 1 座 330kV 的储能站一起，形成玉门“光热储能+光伏+风电”示范项目。该项目总装机容量 70 万 kW，总投资 49 亿元，年上网新能源发电量约 17.35 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，可供 350 万个家庭一年的用电。该项目相当于年节约标准煤 52.1 万 t，植树造林 140 万亩，经济和生态效益显著。

在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中提到，围绕光伏等重点领域，编制产业链全图景规划，补齐产业链供应链短板，锻造产业链供应链长板，提升产业链整体竞争优势。大力发展风电和光伏，有序开发建设水电和生物质能，扩大地热能综合利用，提高清洁能源占比。抓住碳达峰、碳中和等政策机遇，依托骨干龙头企业，推动智能光伏产业发展，加强高效单晶棒材、单晶硅片、高效单晶光伏电池与组件产品的研发与生产，引进培育逆变器、光伏玻璃等配套产业，形成以光伏制造业创新中心为核心的产学研协同创新体系。根据规划，到 2035 年，风电与太阳能发电总装机容量目标将力争达到 36 亿 kW。同时，国家正加快建设多层次新能源消纳调控体系，目标是到 2030 年，全社会新增用电量需求主要由新增新能源发电满足。

下面是国内目前规模相对较大的集中式及分布式光伏发电的典型案例。

(1) 青海塔拉滩光伏电站。

塔拉滩光伏电站位于中国青海省海北藏族自治州，是中国最大的光伏发电基地之一。该电站在规划和建设时充分考虑了当地的自然条件，利用塔拉滩丰富的日照资源和广阔的荒漠土地。塔拉滩不仅为青海省提供了大量的清洁电能，还成为当地经济发展的重要推动力。

该站在设计上采用了先进的高倍聚光光伏技术，通过大面积的聚光镜面将阳光集中到光伏电池上，大幅提高了光电转换效率。同时，塔拉滩电站还实现了光伏与农业、畜牧业的综合利用，即所谓的“光伏+”模式。在光伏板下空间进行农牧业生产，不仅有效利用了土地，还增加了当地居民的收入来源。

环境保护也是塔拉滩项目的重要组成部分。工程建设过程中采取了一系列措施以减少对生态环境的影响，如合理规划施工区域，保护当地植被和土壤，以及在光伏阵列之间留出足够的空间供野生动物迁徙。此外，光伏电站的建成减少了对化石燃料的依赖，有助于减少温室气体排放，对于应对气候变化具有积极意义。

(2) 宁夏中卫市沙漠光伏电站。

中卫市沙漠光伏电站展示了如何将原本贫瘠的沙漠地带转变为重要的能源生产基地。这个建立在沙漠上的光伏电站，避免了对耕地和林地的占用，实现了生态保护与能源开发的平衡。

该电站采用了多种光伏技术，包括单晶硅和多晶硅太阳能电池板，以及最新的光伏跟踪系统，能够随着太阳的移动自动调整角度，使太阳能的吸收和转换效率最大化。除了发电功能外，该电站还结合了旅游和科教功能，成为展示新能源技术的窗口。

(3) 甘肃敦煌光伏产业园。

敦煌光伏产业园是中国西部地区规模较大的光伏产业集聚区之一，集中了多家国内外



知名的光伏企业。产业园不仅涵盖了光伏发电,还囊括了光伏设备制造、技术研发等环节,形成了完整的产业链。

园区内的企业往往采用最新的技术和设备,推动了光伏产业的技术进步和产业升级。同时,这些企业还与当地政府和研究机构合作,进行光伏技术的研究与开发,助力培养了一批光伏领域的专业人才。

(4) 山东临沂市兰山区分布式光伏项目。

兰山区的分布式光伏项目是典型的城市工业和商业屋顶应用案例。通过在工厂车间、仓库、办公楼等建筑物的屋顶安装光伏板,该项目不仅节省了土地资源,而且降低了企业的能源成本,并为企业提供了清洁能源。

该项目的实施得益于政府的政策支持和技术指导,以及金融机构提供的融资方案。它不仅提升了临沂市的可再生能源利用率,还对改善区域电力供应和促进绿色经济发展起到了积极作用。

(5) 浙江杭州市余杭区农村屋顶光伏项目。

余杭区的农村屋顶光伏项目主要是利用农村地区宽敞的屋顶空间来安装光伏设施。这个项目既为农村家庭提供了一种新的收入来源,又增加了农村地区的能源供应,促进了能源结构的优化。

该项目的推进得到了当地政府的大力支持,包括提供财政补贴、税收优惠和技术支持等。此外,该项目还注重居民的参与和培训,提高居民对光伏发电的认识和操作技能,使得居民不仅是清洁能源的使用者,也成为受益者。

(6) 广东深圳市南山区商业建筑分布式光伏项目。

南山区的商业建筑分布式光伏项目是在高密度城市环境中实施的典型案例。通过在商业楼宇、公共设施建筑等的屋顶或外墙安装光伏组件,该项目不仅提升了建筑本身的能源自给率,还有助于缓解城市电网的压力。

该项目的成功实施展现了城市分布式光伏的巨大潜力,并且通过与建筑一体化设计,光伏系统不仅起到发电的作用,也为建筑增添了美观和现代感。

3.9.2 对中国光伏产业链的分析

对中国光伏产业链各环节的发展情况进行分析,可以看到该产业既经历过高速发展期,也经历过产能过剩的危机,2013年下半年之后在政府调控和市场调整之下走向理性、健康发展。光伏电池或组件的一些关键原料(如多晶硅)、制造设备和辅料也经历了国产化率从无到有、由低到高的发展历程。在硅片、光伏电池组件和电池片等环节中国光伏企业已经具有较强的国际竞争力,在多晶硅环节的国际竞争力次之,而某些光伏关键制造设备和关键辅料环节仍受制于外国企业。

1. 光伏产业链的构成

如图 3-28 所示,以硅电池为例,完整的光伏产业链由一条主线、多条辅线组成。其中,一条主线从多晶硅生产开始,依次经过硅片、电池片、电池组件制造环节,最后建成光伏电站。

除了这条主线,光伏产业链还有多条辅线:

一是关键制造设备,在多晶硅、硅片、电池片等生产环节都有所涉及,如图 3-28、表 3-3 所示。

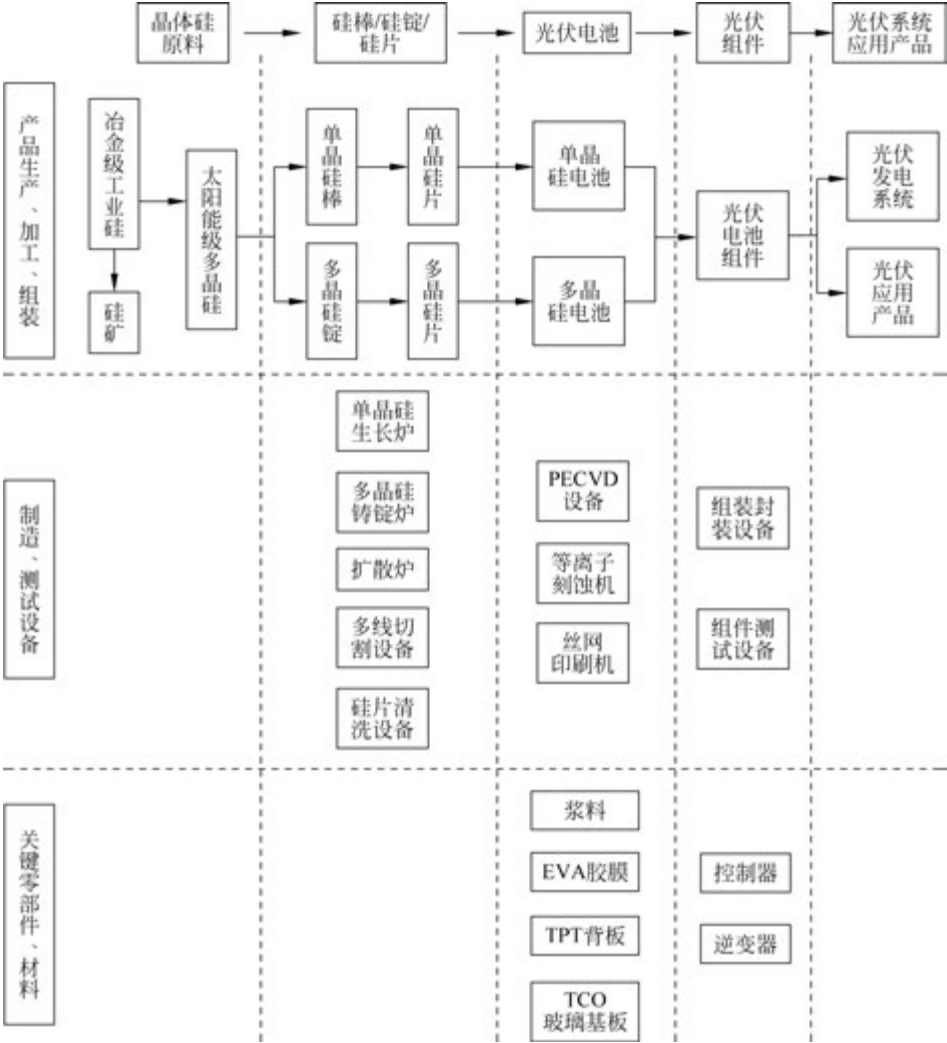


图 3-28 光伏(硅电池)产业链示意图

表 3-3 关键制造设备

环节	多晶硅	硅片	电池片
设备	如用冶金法,有精炼炉、湿法冶金装置、真空冶炼装置; 如用西门子法,有精馏塔、还原炉、氯化装置、氯化装置; 铸锭炉、单晶炉等	开方机、多线切割机、硅片清洗设备等	清洗制绒设备、扩散炉、PECVD、丝网印刷机等

二是关键辅料,主要存在于电池片生产环节,包括银浆、光伏玻璃、EVA 胶板等。

三是关键零部件,主要存在于电池组件制造和电站建设环节,包括逆变器、控制器、跟踪器等。