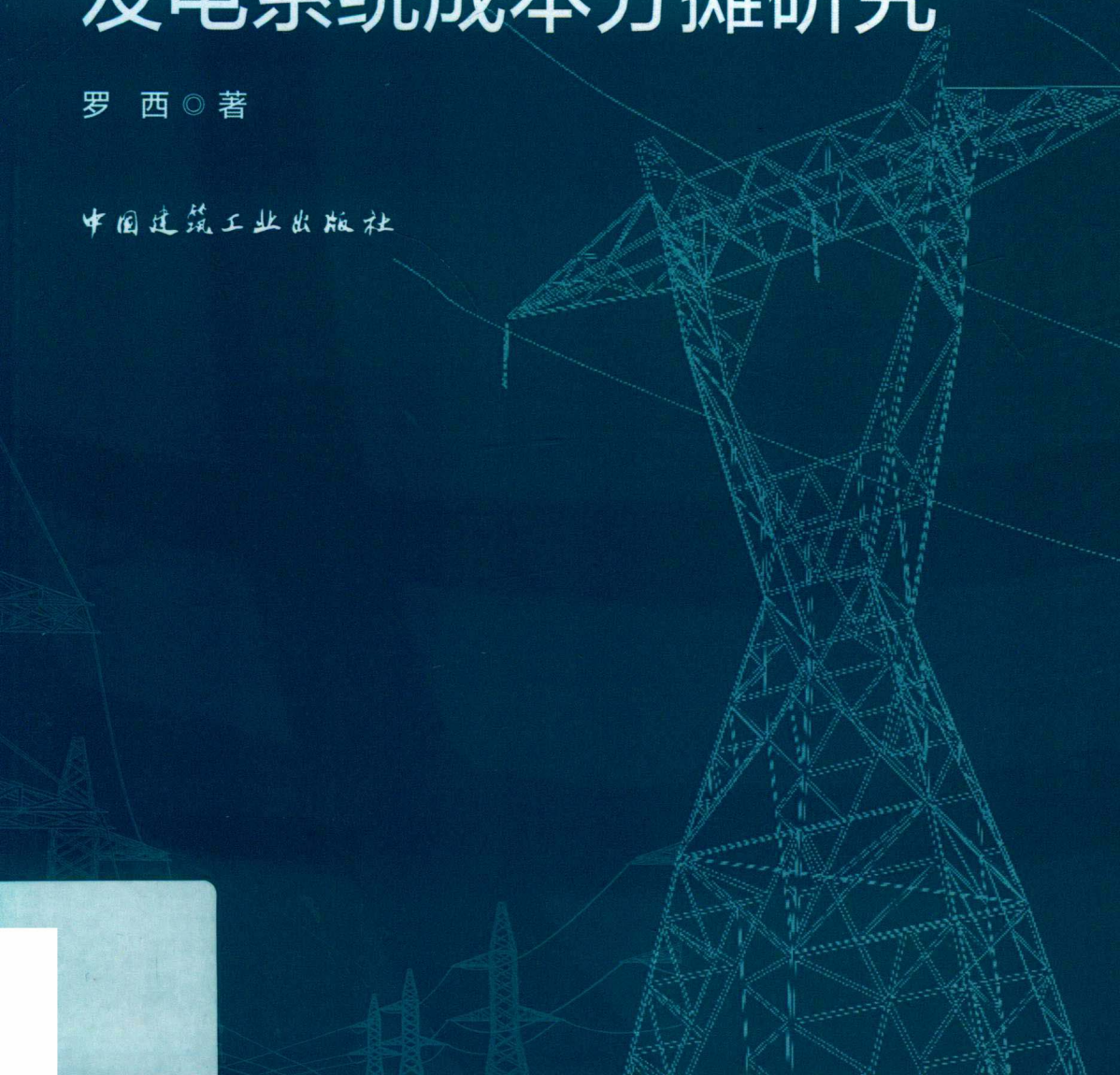


STUDY ON COST ALLOCATION OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION
SYSTEM FOR RESIDENTIAL BUILDINGS IN CHINA

中国居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊研究

罗 西 ◎ 著

中国建筑工业出版社



中国居住建筑分布式 光伏发电系统 成本分摊研究

罗西 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊研究 / 罗西著. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.4
ISBN 978-7-112-23407-3

I. ①中… II. ①罗… III. ①太阳能光伏发电 — 成本管理—研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第041462号

近年来,我国居住建筑分布式光伏产业快速发展,在取得一定发展成果的同时,也发现了一些问题。分布式光伏作为开发、利用太阳能的重要方式,对于改善未来居住环境、提供清洁能源供应都有重要意义。本书以居住建筑分布式光伏为研究对象,建立了基于合作博弈论的中国居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊方法,为政府决策及居民投资提供了理论支持。

本书主要内容包括:绪论、居住建筑分布式光伏技术特征评价及政策环境分析、居住建筑分布式光伏发电系统平准化能源成本计算、居住建筑分布式光伏发电系统运行策略优化分析、居住建筑分布式光伏发电系统外部性分析及收益测算、居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊研究、中国居住建筑分布式光伏产业政策改进建议。

本书可作为相关专业师生和行业从业人员的学习、参考用书。

责任编辑:张晶 吴越恺

责任校对:焦乐

中国居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊研究

罗西 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京点击世代文化传媒有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本:787×960毫米 1/16 印张:8½ 字数:147千字

2019年6月第一版 2019年6月第一次印刷

定价:35.00元

ISBN 978-7-112-23407-3

(33718)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

分布式光伏是开发利用太阳能的重要方式，对保障未来清洁能源供应和人类居住环境改善具有深远意义。经过近几年的市场培育，中国居住建筑分布式光伏产业已逐渐进入商业化发展阶段，装机容量增速却始终低于市场预期。在科技进步促使光伏成本不断下降的技术环境下，产业链上不同主体的成本分配不均问题已逐渐成为中国居住建筑分布式光伏产业发展的主要障碍。因此，如何科学、公平、合理地在不同利益主体之间分摊系统成本，成为了解决中国居住建筑分布式光伏发展问题的关键。

本书以居住建筑分布式光伏为研究对象，在查阅国内外大量文献资料的基础上，建立了基于合作博弈论的中国居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊方法，为政府决策及居民投资提供了理论支持。全书分为7章：第1章为绪论，综合介绍了居住建筑分布式光伏在国内外的研究与发展现状；第2~3章从全生命周期视角分析居住建筑分布式光伏发电系统成本构成，通过平准化能源成本模型对中国不同地区居住建筑分布式光伏的度电成本进行测算，并对其变化趋势进行预测；第4章基于优化理论，对居住建筑分布式光伏发电系统的运行策略进行了优化分析；第5章梳理了中国居住建筑分布式光伏相关利益主体的构成，选择电网公司、政府和居民三个关键主体，以中国不同地区自然资源环境及经济发展水平的约束为前提，构建了居住建筑分布式光伏内外部收益的测算方法；第6章以合作博弈论为理论基础，建立了居住建筑分

布式光伏发电系统的成本分摊模型并计算求解，同时动态分析了算法、储能电池及负荷转移对成本分摊结果的影响；根据以上计算结果，作者在第7章提出促进中国分布式光伏产业健康发展的政策调整建议。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作者联系方式：luoxi0513@gmail.com

作 者

2018年12月

C 目 录

CONTENTS

1	绪 论	
1.1	研究意义	002
1.2	历史沿革	003
1.3	文献综述	007
1.4	研究意义	014
2	居住建筑分布式光伏技术特征评价及政策环境分析	
2.1	居住建筑分布式光伏发电系统分类	018
2.2	居住建筑分布式光伏发电系统技术特征	020
2.3	中国现行分布式光伏政策体系分析	024
2.4	居住建筑分布式光伏发展前景分析	026
3	居住建筑分布式光伏发电系统平准化能源成本计算	
3.1	平准化能源成本测算模型	040
3.2	平准化能源成本影响因素分析	041
3.3	平准化能源成本预测	043
3.4	案例分析	044
4	居住建筑分布式光伏发电系统运行策略优化分析	
4.1	基本运行模式	056
4.2	运行优化	058
4.3	案例分析	064

5	居住建筑分布式光伏发电系统外部性分析及收益测算	
5.1	居住建筑分布式光伏发电系统外部性分析·····	072
5.2	居住建筑分布式光伏发电系统收益分析·····	074
5.3	案例分析·····	080
6	居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊研究	
6.1	成本分摊方法·····	088
6.2	居住建筑分布式光伏发电系统成本分摊模型·····	092
6.3	案例分析·····	095
7	中国居住建筑分布式光伏产业政策改进建议	
7.1	补贴政策建议·····	110
7.2	电价政策建议·····	111
7.3	商业模式建议·····	112
7.4	体制机制建议·····	113
7.5	下一步研究展望·····	115
	参考文献·····	117

1 | 绪 论

1.1 研究意义

能源是社会发展的基础。煤炭、石油、天然气等化石能源在近两个世纪内为人类社会的发展做出了不可磨灭的贡献，但也由于其自身的不可再生性而正在走向枯竭。根据《BP 世界能源统计年鉴（2016 版）》相关统计数据，全世界拥有的石油储量仅够继续使用 40 年，2030 年将成为世界石油产量的顶峰，接下来的石油产量会因剩余储量开采难度的增大而快速下降；全世界煤炭可采储量大约为 8475 亿吨，尽管目前世界煤炭可采储量相对稳定，但长期来看仍呈下降趋势，在保持当前煤炭消费水平的情况下最多维持 200 年左右的时间；如果世界天然气年开采量维持在 2015 年的 3.5 万亿立方米，则 177 万亿立方米的世界天然气可采储量将在 50 年内枯竭。21 世纪前 20 年是中国经济发展的重要时期，随着工业化、城镇化、数字化进程的加快，居民消费结构的迅速升级，能源消费也将大幅度增加。然而，作为电力消费和电力装机世界第一大国，中国能源资源“富煤、贫油、少气”的特点突出，石油和天然气的供给缺口只能依靠进口来解决。面临复杂多变的国际环境，过高的对外依存度对中国能源和经济安全始终形成威胁。

使用化石燃料的另一弊端是开采、运输以及燃烧过程中对周围环境带来的不利影响。众所周知，化石能源的过度使用是导致全球气候变化的最主要原因，而煤炭是对环境造成威胁较大的能源种类之一。中国是世界上最大的煤炭生产国和煤炭消费国，煤炭作为中国的主要一次能源，是国民经济的重要支柱，但其对周围环境造成的严重影响也广受国内外关注：开采过程中，煤矿井下大面积塌陷所形成的采空区易造成地面沉降；洗选过程中，周围水资源会因洗煤废水受到污染，筛选的矸石自燃也会排放出大量的二氧化硫、一氧化碳等有毒气体；存储装运过程中，煤粉尘四处扩散，对人体健康造成危害。对环境的影响最大、最直接的过程是煤炭的燃烧利用。中国煤炭消费形式主要为直接燃烧，约有近一半的煤炭用于燃煤发电，煤烟型污染严重。尽管国家已出台一系列强有力的节能减排措施，中国二氧化硫和二氧化碳排放量仍位居世界首位，酸雨区已占到国土面积的 30% 以上。为了有效降低化石燃料的使用对地球产生的负面影响，世界各国在 2015 年的巴黎气候大会上提出了使全球温升控制在 2% 以内的共同努力目标。2018 年 3 月 5 日发布的国务院政府工作报告对二氧化硫、氮氧化物及重点地区细颗粒物（PM_{2.5}）的排

放量及平均浓度提出了全年下降指标要求，以加强中国生态文明建设，推动环保工作深入开展。

近几年来，世界能源市场复杂多变，不确定性和不稳定性进一步增加。可再生能源由于市场和产业布局尚未完全形成，未来发展空间十分巨大，其本土性和清洁性的特点已引来越来越多国家的关注。但更重要的是，在“后石油”时代，掌握可再生能源技术就意味着掌握了国家能源安全的主动权，不仅能为新一轮的经济增长积蓄力量，更能在国家间政治博弈中增加自身砝码。当前，中国能源发展战略正面临着重大转型，经济结构调整和新型城镇化对能源发展提出了新要求，安全、稳定、绿色、环保的能源供应必将成为中国经济的发展基础。加快发展可再生能源产业，一方面能够推动中国能源产业可持续发展，有效缓解经济发展进程中资源和环境的双重压力，另一方面也能加快能源产业转型升级，是培育中国新经济增长点的重要战略举措。

太阳能是极具发展潜力的可再生能源，不仅具有环保优势突出、成本下降显著的特点，资源储备上也具备大规模快速发展的条件，可有效弥补传统能源消费模式的缺陷，促进能源结构转型，降低污染排放，实现经济的绿色、低碳和可持续发展。在油气资源难以担当中国能源转型升级重任的情况下，太阳能在与其他能源的竞争中逐渐胜出，有望成为中国能源转型升级的主力军。

1.2 历史沿革

1954年，世界上第一块单晶硅太阳能电池在美国贝尔实验室制作完成，将太阳光能转化为电能的光伏发电技术由此诞生。在经历了60余年的发展之后，光伏发电终于迈入了规模化应用的快速发展阶段。德国率先践行的大规模光伏电力生产模式，在大部分欧洲地区星火燎原之后，由中国、美国、日本和印度接续并向世界各个角落普及，为全球能源和环境的可持续发展带来了新希望。分布式光伏发电作为一种新型的光电利用方式，因其灵活可靠的特点在世界多个国家同样得到了广泛应用。其中，德国在国家战略、基础设施、电力市场、支持政策等多方面具备有利条件，经过多年以可再生能源为主的能源体系发展和完善，分布式光伏发电现已成为德国主要的电力来源之一。美国以市场经济为基础，通过净电价、配额制等制度创造了灵活的市场氛围，加之联邦和州政府对分布式电力的经济支持政策，分布式光伏得以较快发展。

在中国，分布式光伏产业经历了以下三个发展阶段：

金太阳时期：2002年，“送电到乡工程”标志着中国分布式光伏产业发展的序幕被正式拉开。2009年开始，中国分布式光伏产业在政府投资补贴的帮助下得到了迅猛发展，具有代表性的是“金太阳”和“光伏建筑一体化”两项工程。

行业低谷期：2010年，国务院把新能源作为七大战略性新兴产业之一，随后国家进一步出台了支持光伏产业发展的系列政策，江苏、浙江、河北等地涌现出大量的光伏产品制造企业，尚德、英利、赛维 LDK 等多家企业成功在国际资本市场上市，市场份额曾一度达到全球领先。然而，短时间内的盲目扩张导致中国光伏制造业产能严重过剩，光伏组件产量位居世界第一的同时产品主要出口国外，国内市场规模很小，畸形的市场倒挂使中国光伏产业严重受制于人。2009年的全球金融危机致使国际光伏市场需求大幅萎缩，中国光伏产业遭受市场寒冬。自2011年开始，欧美等光伏产品主要出口国开始向中国光伏制造企业实施“双反”调查并征收高额关税，中国光伏产业过度依赖国际市场的弊端开始大规模显现，大量光伏制造企业受到致命打击，一度知名的尚德公司甚至于2013年3月宣告破产。

快速发展期：为扶持光伏产业走向健康的发展道路，国务院分别于2012年12月和2013年6月召开常务会议，研究促进光伏产业健康发展的政策与举措，把积极开拓国内光伏应用市场、着力推动分布式光伏发电作为一项重要措施，鼓励工商业厂房、家庭、社区建设分布式光伏项目。2013年7月，财政部出台《关于分布式光伏发电实行按照电量补贴政策等有关问题的通知》^[1]，确保国家补贴资金及时足额发放给项目单位。2013年8月，国家发改委发布了《关于发挥价格杠杆作用促进光伏产业健康发展的通知》^[2]，按光伏电站资源和建设条件制定了三类区域的标杆上网电价，规定对分布式光伏发电实行0.42元/(kWh)的全电量补贴，执行时间为20年。同月，国家开发银行会同国家能源局出台了《关于支持分布式光伏发电金融服务的意见》^[3]，意在推动地方政府在试点地区成立以企业信用为基础、以市场化方式运作、具备借款资格和承贷能力的融资平台，由国家开发银行对分布式光伏提供融资支持，提供以中长期贷款为主，短期贷款、流动资金贷款为辅的多元化信贷产品，并给予贷款条件优惠。可以说，0.42元/(kWh)的全电量补贴全面开启了中国分布式光伏产业健康发展的新时代。在此之后，国家相关部委、

地方政府、电网公司、政策性银行等纷纷出台促进分布式光伏产业发展的行业及地方扶持政策,全国多个分布式光伏示范项目进入实施阶段。为适应光伏发电效率不断提升和成本快速下降的新形势,国家发改委于2017年12月发布《关于2018年光伏发电项目价格政策的通知》^[4],将分布式光伏度电补贴由0.42元/(kWh)调整为0.37元/(kWh)。根据能源发展“十三五”规划,中国分布式光伏装机规模在2020年前将达到6000万千瓦,同时力争实现用户侧平价上网^[5]。

分布式光伏虽然在中国发展前景良好,但普通百姓对分布式光伏的了解度和认可度仍然偏低,这种情况极大地阻碍了分布式光伏的长远发展。与此同时,中国一些偏远地区由于地理位置等原因长期处于供电困难的状态,急需能够独立供电的微电网系统来保证电能的稳定供应。结合分布式光伏的建设特点,为一些偏远地区、贫困户建设居住建筑分布式光伏发电系统,不仅能够解决当地居民用电难的问题,还能充分利用部分贫困地区太阳能资源丰富的自然优势,提高当地贫困户的经济收益。此外,在贫困地区推广建设分布式光伏能够切实提高百姓对光伏行业的信任度,为光伏发电走进千家万户打下坚实基础。基于以上原因,国家能源局和国务院扶贫开发领导小组办公室于2014年10月11日联合印发《关于实施光伏扶贫工程工作方案》^[6],计划利用6年时间组织实施光伏扶贫工程,在安徽、宁夏、山西、河北、甘肃、青海的30余县开展首批光伏试点项目。2015年3月9日,国家能源局新能源和可再生能源司发布《光伏扶贫实施方案编制大纲(试行)》^[7],规定由地方政府对户用和基于农业设施的光伏扶贫项目给予35%初始投资补贴,对大型地面电站给予20%初始投资补贴,国家按等比例进行初始投资补贴配置;户用和基于农业设施的光伏扶贫项目还贷期5年,享受银行全额贴息,大型地面电站还贷期10年,享受银行全额贴息。2016年3月24日,国家发展改革委、国务院扶贫办、国家能源局、国家开发银行、中国农业开发银行联合下发《关于实施光伏发电扶贫工作意见的通知》^[8],要求2020年之前,重点在前期开展试点的、光照条件好的16个省的471个县的约3.5万个贫困村,以整村推进的方式,保障200万无劳动能力贫困户(包括残疾人)每年每户增加收入3000元以上,其他光照条件好的贫困地区可按照精准扶贫的要求因地制宜推进实施。2016年10月,总规模达516万千瓦的第一批光伏扶贫项目名单在国家能源局网站上公布,具体相关信息见表1-1。

第一批光伏扶贫项目信息汇总^[9]

表 1-1

序号	地区	村级电站规模 (万千瓦)	集中式电站规模 (万千瓦)	总量 (万千瓦)
1	河北	30	55	85
2	河南	0.5	10	10.5
3	安徽	31.2	30	61.2
4	山西	18.4	40	58.4
5	山东	31.7	80	111.7
6	湖北	5.8	25	30.8
7	陕西	6.6	20	26.6
8	云南	3.1	10	13.1
9	甘肃	8.4	—	8.4
10	吉林	16.5	20	36.5
11	江西	54	8	62
12	江苏	3.5	—	3.5
13	湖南	3.84	—	3.84
14	辽宁	4.6	—	4.6

在国家光伏扶贫政策基础之上，各省出台的光伏扶贫补贴政策不尽相同：2015年，安徽省人民政府规定户用光伏电站建设资金采取省级补助、市县安排和贫困户自筹各 1/3 的办法筹资；甘肃省扶贫办、甘肃省发改委《关于上报光伏扶贫试点实施方案的通知》^[10] 中明确指出，省扶贫办按每户 1/3 安排省级财政扶贫资金；陕西省发改委、陕西省扶贫办《关于开展光伏扶贫工作的实施意见》^[11] 中则说明，贫困户和贫困村在户用和村级光伏电站上的建设资金出资比例原则上不少于 1/3。部分省份光伏扶贫政策见表 1-2。

部分省份光伏扶贫政策汇总

表 1-2

省份	文件名称	补贴政策
湖南	《湖南省能源发展补短板行动计划(2016—2018年)》 ^[12]	建立多渠道投融资机制，建设资金通过省预算内资金、产业扶贫资金、国家开发银行贷款、扶贫小额贴息贷款和省财政专项资金统筹解决
陕西	《陕西省关于开展光伏扶贫工作的实施意见》 ^[11]	户用和村级光伏电站建设资金，贫困户和贫困村出资比例不少于 1/3，若自身无力承担，可申请扶贫贴息贷款解决。集中式扶贫光伏电站可采用土地入股、申请长期政策性贷款等方式筹资建设

续表

省份	文件名称	补贴政策
青海	《青海省 2015 年光伏扶贫试点工作方案》 ^[13]	光伏扶贫电站建设每瓦投资 9 元, 建设 150 兆瓦共投资 1350 亿元, 由合作企业全额投资
山西	《山西省关于 2016 年新实施强农惠农富农补贴政策的 通知》 ^[14]	实施光伏扶贫和旅游扶贫工程。安排资金 2 亿元。其中: 安排资金 1.5 亿元, 在 58 个贫困县的 300 个贫困村建设 100 千瓦村级分布式光伏扶贫电站; 安排资金 5000 万元, 在全省 100 个建档立卡贫困村开展乡村旅游扶贫

1.3 文献综述

虽然分布式光伏近年来在中国得到了快速发展, 但政府的高度重视和联合施策并没有完全解决产业发展中存在的问题, 中国分布式光伏装机占全部光伏装机的比例仍远低于欧美等国家, 原因可归纳为以下三条: 第一, 相比于传统燃煤发电与集中式光伏发电, 分布式光伏发电成本仍然较高, 居住建筑分布式光伏发电成本更高, 民众接受度与市场普及率偏低; 第二, 居住建筑分布式光伏涉及利益主体众多, 影响作用较为直接的有居民、政府、电网公司、物业管理公司、项目投资开发商及小区内其他住户等, 由于成本分摊方式欠科学, 利益主体间不平衡问题严重, 协调难度较大; 第三, 外部性的存在造成居住建筑分布式光伏各利益主体投入产出不协调, 其表现形式就是现行的国家和地方补贴政策适应性较差, 难以符合不同地区居住建筑分布式光伏的实际需要, 进而形成各方参与居住建筑分布式光伏积极性不高的客观现象。

对于中国大多数居民来说, 建设分布式光伏发电系统是一笔较大投资, 单纯依靠居民用户自身投资很难实现。因此, 分布式光伏补贴政策的合理制定成为现阶段提高分布式光伏投资收益最直接、最有效的手段。分布式光伏补贴额度的设定, 一方面离不开针对分布式光伏发电系统的传统技术经济分析, 另一方面与分布式光伏所带来的资源、环境、社会等外部性收益密不可分, 牵扯到政府、电网公司、开发商等众多利益相关方。因此, 在不同主体之间明确义务、测算收益、分摊成本就成为解决中国分布式光伏产业发展问题的关键。

通过对国内外相关理论研究的梳理可知, 成本分摊理论的研究主要集中在系统成本计算、各方收入计算、成本分摊模型的建立及应用等方面, 相关文献综述如下:

1.3.1 平准化能源成本

在项目经济评价的方法中,平准化能源成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)是一种用于衡量各种发电技术成本的主要指标,迄今为止已经被广泛应用于能源行业。美国国家可再生能源实验室关于平准化能源成本的定义为:发电项目在运营期内发生的所有成本贴现值与全部发电量贴现值的比值^[15]。由于平准化能源成本的计算结果与发电技术无关,因此可以在不同发电项目或不同发电技术之间进行精确的横向比较,应用领域广泛^[15]。

目前,国内外学者已针对平准化能源成本进行了大量研究,并取得了一些重要成果。国际上,J. Hernández-Moro 和 J.M. Martínez-Duart 利用学习曲线,参考国际能源署的 Blue 和 Roadmap 两种光伏发展路径,对全球光伏未来 40 年的平准化能源成本发展走势进行了预测^[16]; Seth B. Darling, Fengqi You, Thomas Veselka 和 Alfonso Velosa 通过蒙特卡洛法,从统计学角度计算了光伏系统的平准化能源成本^[17]; Xiaoling Ouyang 和 Boqiang Lin 针对中国特有国情,对包含有光伏的三种可再生能源的平准化能源成本进行估算,并推算出在现有条件下各自所需的补贴额度^[18]; Schuyler Matteson 和 Eric Williams 利用学习曲线理论建立了铅酸电池的装机规模与单位价格的关系模型^[19]; C. Parrado, A. Girard, F. Simon 和 E. Fuentealba 对于智利 Atacama 沙漠地区的光伏-光热混合式系统的平准化能源成本进行了测算,并对系统发电量与当地采矿负荷之间的用电平衡进行了系统分析^[20]; K. Branker, M.J.M. Pathak 和 J.M. Pearce 在总结并改进之前光伏发电项目平准化能源成本计算中假设前提的基础上,提出了更加准确的平准化能源成本测算模型^[21]; Peter Kästel 和 Bryce Gilroy-Scott 针对微电网系统的发用电匹配进行了研究分析^[22]; A. Abdelraheem 以埃及不同地区的地理及气候条件为研究背景,通过 SAM 软件对带有跟踪系统的光伏平准化能源成本进行了测算^[23]; Ilja Pawel 对不同技术类型的储能电池进行了平准化能源成本分析^[24]; Ian Partridge 通过学习曲线预测了印度的风力发电和水电的未来平准化能源成本走势^[25]; Amy J. C. Trappey 和 Charles V. Trappey 认为光伏组件的重要原材料成本以及其他竞争发电技术的价格都会对未来光伏价格产生影响,因此将以上影响因素考虑在内,建立了分层学习曲线模型^[26]; Benedikt Battke 和 Tobias S. Schmidt 等人利用蒙特卡洛方法模拟了输入变量的变化对四种技术类型的光伏储能电池全寿命周期内平准化能源成本所造成的影响^[27]; Ignacil Mauleon 在全世界范围内进行了光伏产业学习率的测算^[28];

Sungjun Hong 和 Yanghon Chung 在既有学习曲线理论研究的基础上,提出了考虑科技研发费用的两种影响因素学习曲线,提高了光伏系统未来价格走势测算的实用性和准确性^[29]。

虽然已有关于分布式光伏平准化能源成本的大量研究,但研究对象多为国外特定地区的具体项目,针对中国不同地区光照资源条件所进行的分类研究仍然较少,且现有研究主要集中在无储能的分布式光伏发电系统,研究范围有待扩大。

1.3.2 外部性理论

外部性理论最早由“剑桥学派”创始人马歇尔(Marshall)提出,其研究的关键在于如何通过外部性内部化的方法消除市场失灵,恢复市场资源配置效率。对于外部性的内部化途径,经济学家认为主要有以下三种形式:①依靠政府的干预,英国经济学家庇古(Arthur Cecil Pigou)提出的税收补贴就是这类方法的典型代表;②运用市场的力量,如英国经济学家科斯(Coase)认为外部性问题完全可以依靠产权界定来解决;③市场机制与政府干预相结合,美国经济学家戴尔斯(Dales)在该领域有较深的研究,其1968年提出的“排污权交易”制度可以在一定程度上代表该理论。在可再生能源领域,Shih-Chang Tseng 和 Shiu-Wan Hung 使用决策模型对碳交易价格进行测算^[30];Sebastián Oliva H., Iain MacGill 和 Rob Passey 对家用分布式光伏系统所带来的社会价值进行了细致的分析计算^[31];Jinqing Peng, Lin Lu 和 Hongxing Yang 从全寿命周期的角度分析了光伏系统的温室气体排放和能源回收期的问题^[32];张俊翔和朱庚富对光伏发电和燃煤发电的生命周期进行了比较研究^[33];Zhan-Ming Chen 和 Yu Lin 等人从税收管理的角度对如何减少我国煤炭使用所造成的环境负外部性进行数学建模并得到计算结果^[34];Christian Breyer, Otto Koshinen 和 Philipp Blechinger 将光伏系统对温室气体排放减少所起到的积极作用进行了量化分析,并将计算结果与现行的二氧化碳价格进行了对比^[35];Thu Lan Nguyen Thi 和 Bertrand Laratte 等人将 EPS 2000, Stepwise2006 和 Ecotax 三种算法应用到了环境外部性的内部化问题上^[36];Mario Richter 从机会与威胁两个方面分析了分布式光伏给德国电网公司带来的影响^[37]。Paulo Moises Costa 和 Manuel A.Matos 研究计算了微电网建设所减少的低压电网建设费用^[38];于建成、迟福建等人对分布式电源接入对电网的稳定特性、电能质量以及保护等方面的影响进行了分析^[39];Mansi Zhang, Yu Song 和 Xuhui Cai 以燃煤发电所引起的颗粒

物污染为研究对象,对颗粒物如何影响污染源当地以及周边居民的致病率和致死率进行了分析,并将结果应用于中国 111 个大中型城市以进行验证^[40, 41]; Vasilis M. Fthenakis, Hyung Chul Kim 和 Erik Alsema 对单晶硅、多晶硅、带状硅和薄膜四种类型的商业光伏系统全寿命周期内的温室气体排放量进行了横向比较^[42]; Sebastián Oliva H., Iain MacGill 和 Rob Passey 分析了澳大利亚的民用分布式光伏系统在减少线路损耗、颗粒物排放和温室气体排放等方面所带来的边际经济效益和边际环境效益^[43]; Roberto Turconi 和 Alessio Boldrin 等人比较了燃煤发电、燃气发电、燃油发电、核电、生物质发电、水电、光伏以及风电在全寿命周期内的温室气体、氮氧化物和二氧化硫的排放量^[44]; V. M. Fthenakis 和 H. C. Kim 对包含周边系统及跟踪系统的分布式光伏进行了全寿命周期内的环境效益分析^[45]; Geoffrey P. Hammond 和 Hassan A. Harajli 则将环境效益分析的对象转向了英国光伏建筑一体化系统^[46]; Dorothée Charlier 和 Anna Risch 从社会福利的角度分析了在可再生能源与传统能源并行的能源结构中,上网电价政策调整所带来的一系列影响^[47]。

准确分析外部性的表现形态是决定外部性分析结果的关键,以中国目前寒冷地区住宅的节能改造为例,壁挂炉锅炉、小区集中供暖和市政集中供暖外部性的表现形态不一样:壁挂炉锅炉的全部投资和全部收益都由居民承担和享受,不涉及外部性;小区供暖对小区全体居民都有影响,物业公司就需要在考虑外部性的前提下进行规划;市政供暖对外部性分析的要求更高,涉及利益主体更多,外部性的存在形态也更为复杂和多样化。尽管外部性影响分析与评价在可再生能源研究领域并不陌生,但以中国分布式光伏外部性的存在形态为分析对象,并有针对性地提出外部性内部化的解决方案的研究仍然较少,研究空间值得进一步拓展。

1.3.3 系统设计运行优化

光伏发电系统的容量配置和运营策略与其自身系统类型、电网公司电价政策、用户负荷曲线、所在地气候资源条件、地方以及国家产业政策等因素息息相关。作为成本分摊计算的基础,光伏发电系统的设计运行模式分析是本研究的难点所在。随着近几年光伏产业的快速发展,光伏发电系统在多种自然及政策环境下的设计运行优化模式已引起学术界的广泛关注。在无储能光伏发电系统方面, Y.V.Pavan Kumar 和 Ravikumar Bhimasingu 以基于居住建筑的光伏与风电混合动力模型为研究对象进行系统的技术经济可行性分析^[48]; T. Beck 和 H.