

光伏资源精细化评估与 预报技术研究

GUANGFU ZIYUAN JINGXIHUA PINGGU YU YUBAO JISHU YANJIU

李 芬 陈正洪 马年骏 胡 超 杨兴武 等 编著



光伏资源精细化评估与 预报技术研究

李 芬 陈正洪 马年骏 胡 超 杨兴武 等 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

近年来,在应对气候变化、促进经济社会可持续发展的背景下,风能、太阳能等清洁能源开发方面取得了巨大的发展和进步。本书系统地阐述了光伏资源精细化评估与预报技术,旨在促进能源电力及气象技术领域的融合。本书适合从事太阳能资源开发以及光伏电站设计的技术人员参考,也可供高校电力和气象能源相关专业的教师、研究生以及高年级本科学子参考。

图书在版编目(CIP)数据

光伏资源精细化评估与预报技术研究 / 李芬等编著. --

北京:气象出版社,2016.11

ISBN 978-7-5029-6382-8

I. ①光… II. ①李… III. ①太阳能-资源开发-研究-中国

IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 269438 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:齐 翟

终 审:邵俊年

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:易普锐创意

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:7.5

字 数:205 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价:35.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

当前,国际国内的经济形势、能源形势正在发生深刻的变化,新一轮的世界能源变革已经拉开序幕。欧美发达国家从应对气候变化、保障能源安全、促进经济增长的需要出发,相继提出发展清洁能源发电技术。我国政府高度重视清洁能源发展,并做出一系列重要部署,推动绿色发展取得新突破。2016年李克强总理在政府工作报告中强调“增加天然气供应,完善风能、太阳能、生物质能等发展扶持政策,提高清洁能源比重”。国家“十三五”规划中明确提出:坚持绿色发展,推动低碳循环发展;推进能源革命,加快能源技术创新,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系;加快发展风能、太阳能、生物质能、水能、地热能,安全高效发展核电;加强储能和智能电网建设,发展分布式能源,推行节能低碳电力调度。

从长远看,在各种清洁能源技术中,太阳能光伏发电具有最理想的可持续发展特征:最丰富的资源和最洁净的发电过程。作为技术成熟、具有规模化开发和商业化的新能源发电方式有着极大的应用前景。因此,太阳能光伏发电成为全球可再生能源发展的最大着力点,也是最亮点之一。值得提出的是,太阳能资源因地而异,随时而变,与气象环境条件密切相关,准确预报太阳能资源的变化和光伏发电功率的波动,将成为保障居民用电安全和电网平稳运行的必然要求。正值国内外光伏发电产业蓬勃发展的时刻,有关光伏资源评估和预报技术的科学和技术知识也成为社会最迫切、最渴望的需求之一。

我们面前呈现的《光伏资源精细化评估与预报技术研究》这本专著,从太阳能资源评估和光伏系统运行角度出发,尝试融合能源气象及电力技术两大领域,结合前端太阳能资源禀赋(气象)和后端光伏发电系统性能(电力),结合一套综合评估体系和体现地区差异的判断标准,为新能源开发和优化设计提供可靠翔实的理

论依据;结合数学方法和物理手段,研究光伏发电系统中各能量转换过程,分析典型气象环境要素对发电效率(或发电量)的影响机制和多变量耦合关系,在此基础上建立多种光伏发电量(功率)预测预报模型。

本书作者根据多年从事光伏发电及其相关研究的实践经验,从实用角度出发,系统完整地介绍了有关光伏发电的相关知识,使得本书具有很强的知识性、可读性和实用性,图文并茂,文字流畅。本书无论对从事光伏发电的专业人士,还是那些渴望进入光伏发电领域或是热心关注光伏发电的读者,都是一本应读的好书。

我殷切希望本书能为我国光伏发电技术及相关产业的发展发挥积极作用。

中国工程院院士

丁一凡

2016年4月5日

前 言

太阳能光伏发电技术自 20 世纪 90 年代后半期进入了快速发展时期,2015 年全球光伏发电新增装机容量 59 GW,创历年新高,全球光伏累计装机容量突破 220 GW。光伏发电是整个可再生能源发电技术中增长速度最快的,在能源结构中正在发挥越来越大的替代作用。

加快开发利用可再生能源,走多元化能源发展道路,已成为我国实现能源利用可持续发展和环境保护的重要举措。中国气象局风能太阳能资源评估中心的研究表明,我国陆地三分之二以上的国土面积年总日照时数在 2 200 小时以上,太阳总辐射年总量超过 $5\,000\text{ MJ/m}^2$,为太阳能光伏开发利用提供了良好的先天资源条件。在一系列配套政策和法规的驱动下,我国光伏累计装机容量发展势头强劲,自 2006 年以来装机容量年增长速度均达到 100% 以上,大幅超过国际平均水平。国家能源局《太阳能发电发展“十二五”规划》极大地肯定了城市建筑光伏这一利用形式,为我国城市建筑光伏的发展创造了良好的政策环境。研究建筑光伏并网发电的基础技术问题,降低时空不确定性对电网的冲击和影响,减少旋转备用容量,将为高效和更经济的建筑光伏利用提供重要的理论基础,对国家层面及市场作用推动建筑光伏利用的规模化进程具有重要的现实意义。

本书选取资源较为丰富、经济较发达的京津冀和中东部地区代表城市北京、上海和武汉,研究水平面直射分离模型、光伏阵列斜面辐射(墙面辐射)精确模型及最佳倾角;分析典型气象环境要素对光伏发电各环节效率(或发电量)的影响机制和多变量间耦合关系,并最终得到定量描述的数学模型;整合太阳能资源禀赋和光伏气象发电物理原理,建立一套综合的性能评估指标体系和体现地区差异的标准,并推导并网光伏发电潜能计算方法。通过上述研究,初步实现城市建筑光伏发电的精细化评估及预报理论指标体系,促进能源电力与气象技术领域的融合。希望本书能够对提高我国的光伏应用技术水平有所促进。

本书所述内容是作者自参加工作以来从事太阳能资源开发及电力能源气象相关的教学和研究工作的成果总结。作者在近年来承担了国家自然科学基金项目“建筑光伏发电关键气象环境因子影响机理及综合评估体系研究”(编号:51307105)、上海市教委青年教师资助计划“分布式建筑并网光伏发电功率预报技术研究”(编号:ZZsdl 13016),并参与了财政部公益性行业(气象)科研专项“太阳能预报技术研究”(编号:GYHY 201006036)、“太阳能光伏资源精细化评估技术研究”(编号:GYHY 201306048)以及中国气象局气象关键技术集成与应用重点项目“太阳能光伏发电预报系统优化与应用”(编号:CAMGJ 2012Z07)、湖北省财政厅“太阳辐射能量转换效率气象观测示范工程”、河南省电力科学研究院“河南省光伏发电功率预报创新研究及预报平台”(编号:SGTYHT/14-JS-190)等项目,对太阳能资源评估、直散分离模型、斜面辐射预报、光伏发电与气象环境因子的诊断分析、光伏发电系统效率精细化评估及发电量(或功率)预报技术等进行了大量的前期研究,并取得了一定的研究成果。且近年来,参加了多地的光伏示范电站的气象要素与发电功率(发电量)高分辨率同步对比观测系统的设计和维护,得到了大量可供分析的气象和光伏发电功率(发电量)的试验观测数据。这些都为作者研究工作的开展及本书的撰写建立了良好的基础并提供了丰富的理论依据。在此对给予研究经费支持的相关部门、提供技术指导的专家和学者以及参与研究工作的相关单位和研究生表示衷心的感谢。

目前太阳辐射理论模型大多是国外研究人员根据当地气候特征和地理环境得出的经验或半经验公式,本书的编写旨在反映出我国太阳能资源特性和气候特征及其与我国气候要素间内在联系和规律,为光伏资源评估与预测预报提供指导。第一章介绍了研究背景及国内外研究现状,分析了开展此项研究的意义。第二章对北京、上海、武汉三地的太阳能资源进行评估,为光伏电站选址及优化设计做铺垫。第三章修正并建立了适合用于北京、上海、武汉三地散射比估算的直散分离模型,提高了直射、散射辐射的预测精度。第四章对武汉地区光伏组件最佳倾角进行了计算,得出了倾角的最佳调整方案。第五章介绍了太阳辐射模型在北京、上海、武汉三地墙面辐射预测中的应用,得出了最优预测模型。第六章介绍了光伏系统性能指标定义及评估方法,分别对离网和并网光伏发电系统进行了效率

精细化分析与发电潜能估算。第七章介绍了太阳辐射及光伏发电预报技术,并对太阳辐射数值预报模式进行了改进,对影响光伏发电量的气象环境因子进行诊断分析,阐述了 CAR 模型和 IOWA 算子以及集合预测法在光伏发电量(或功率)预报中的应用,最后介绍了光伏发电功率预测预报系统的实现与升级。

本书由李芬提出和策划,并完成了第一章、第二章第一部分和第四部分、第六章、第七章第三部分等的具体编写,并与陈正洪、杨兴武一起负责全书统稿和审核把关。陈正洪负责第二章第三部分、第七章第一部分、第二部分、第七部分的编写。马年骏负责第三章、第四章的编写,参与第二章第三部分、第七章第七部分的编写。胡超负责第五章的编写,参与第四章的编写。崔杨负责第七章第六部分的编写,参与第七章第七部分的编写。蔡涛主要参与第六章第三部分的编写。边泽强主要参与第二章第二部分的编写及第二章的审核。宋启军、闫全全、钱加林主要参与第七章第四部分、第五部分、第八部分等的编写。孙朋杰主要参与第七章第二部分的编写。

在日前的科研工作当中,一直试图研究和探索得出究竟哪种模型更适合我国太阳能资源特性和气候特征及其与我国气候要素间内在联系和规律,希望本书能为我国太阳能资源的开发及光伏发电技术研究贡献一点绵薄之力。由于知识、经验和水平所限,再加上时间紧迫,书中难免存在疏漏和不足之处,还望读者提出宝贵的意见,以便我们进一步改进和完善。

李芬

2016 年 3 月于上海

目 录

序	
前言	
第一章 绪论	(1)
一、太阳能资源利用现状	(1)
二、太阳能资源开发利用存在的问题	(2)
三、相关领域的研究进展	(3)
四、研究内容及创新	(8)
第二章 太阳能光伏资源评估	(10)
一、太阳能资源相关术语	(10)
二、评估背景及必要性	(12)
三、我国太阳能资源概况	(14)
四、京沪汉太阳能资源评估	(16)
第三章 京沪汉地区太阳辐射直散分离模型的应用研究	(22)
一、现有直散分离模型介绍	(22)
二、新型直散分离模型的构建与预测检验	(23)
三、结论	(30)
第四章 光伏系统最佳倾角分析	(31)
一、最优模型选择	(31)
二、不同调整形式下光伏阵列的最佳倾角及增益计算	(37)
第五章 京沪汉墙面月平均太阳辐射模型的对比分析	(40)
一、资料与方法	(40)
二、模型评估	(44)
三、结论	(49)
第六章 光伏发电系统性能评估及光伏发电潜能估算	(50)
一、光伏系统性能指标定义及评估方法	(50)
二、离网光伏发电系统的性能分析	(52)
三、并网光伏发电系统的性能分析	(54)
四、武汉地区并网光伏发电潜能估算案例分析	(61)

第七章 光伏发电功率(发电量)预报技术	(62)
一、光伏功率(发电量)预报原理	(62)
二、太阳辐射及光伏发电功率短期预报方法	(62)
三、不同季节光伏发电量与气象影响因子诊断分析	(75)
四、CAR 模型在光伏发电量预报的应用	(83)
五、基于 IOWA 算子的短期光伏发电量组合预测	(87)
六、集合预测法在光伏发电功率预报中的应用	(94)
七、光伏发电功率预测预报系统的实现与升级	(99)
八、结论	(104)
参考文献	(107)

第一章 绪 论

一、太阳能资源利用现状

太阳能是一种清洁无污染、可再生、资源量最大、分布最为广泛的能源。日地平均距离约 1.5 亿 km, 太阳辐射达到大气层顶的能量约为其总辐射能量的 22 亿分之一, 辐射强度约 173 000 TW。太阳辐射穿过大气层时, 约 20% 被大气吸收, 30% 被地面和大气反射到宇宙空间, 约 50% 到达地球表面。尽管如此, 其总量仍非常巨大, 经换算太阳每秒钟照射到地球表面的能量相当于 500 万 t 标煤; 每年到达地球表面太阳辐射能量相当于 130 万亿 t 标煤, 是目前全球能源需求的 10 000 倍以上, 其中在北非、东非、中东、大洋洲、拉丁美洲等赤道附近地区太阳能资源尤为丰富。我国太阳能资源也十分丰富, 据估算我国的陆地表面每年接收的太阳总辐射约为 14 700 万亿 kW · h, 相当于 4.9 万亿 t 标准煤。按地域划分, 我国除了四川盆地的太阳能资源一般外, 其他地区都达到或超过太阳资源丰富区的标准, 尤其是青藏高原地区、新疆东南部、内蒙古西部、甘肃西部地区等为太阳能资源最为丰富区或很丰富区(申彦波等, 2013)。

人类利用太阳能已有几千年的历史, 但发展一直很缓慢, 现代意义上的开发利用只是近半个世纪的事情。1954 年美国贝尔实验室研制出世界上第一块太阳能电池, 从此揭开了太阳能开发利用的新篇章。之后, 太阳能开发利用技术发展很快, 特别是 20 世纪 70 年代爆发的全球性石油危机有力地促进了太阳能开发利用。太阳能通常由光热、光电和光化学等方式转换为热能、电能和化学能后再加以利用。自 20 世纪 70 年代以来, 全世界大部分地区能源消耗成倍增加, 随之而来的是一系列环境及气候变化问题, 太阳能等清洁能源的开发利用越来越受到关注。世界能源委员会的研究报告声称, 到 21 世纪下半叶, 太阳能将成为非常重要的一种可开发利用的能源。光伏发电是目前太阳能利用中技术较成熟的一种太阳能发电系统, 具有不消耗燃料、不排放污染物、规模灵活、安全可靠、维护简单等优点。光伏发电将是今后太阳能利用的主要利用形式, 有离网和并网两种形式, 而并网光伏发电是目前乃至将来的主流趋势。目前欧美国家的太阳能光伏发电早已完成初期开发和示范阶段, 正朝着大批量规模应用及替代常规化石能源的方向发展。光伏并网发电系统不仅涉及光伏电池技术和并网逆变技术, 还涉及电力系统控制和优化等一系列问题(王成山, 2013; 刘振亚, 2015)。

2015 年, 全球光伏发电新增装机容量 59 GW, 创历年新高, 全球光伏累计装机容量突破 220 GW。我国的大规模建设太阳能光伏电站虽然起步较晚, 但自 2006 年以来装机容量年增长速度均达到 100% 以上, 大幅超过国际平均水平。近年来更是出现了蓬勃发展的局面, “太阳能屋顶计划”“金太阳”等应用示范工程以及国家和地方有关光伏上网电价及补贴政策的实施, 对太阳能的大规模发展起到了重要的推动作用。2014 年, 我国光伏发电累计装机容量超

过 28 GW,其中,光伏电站 2 338 万 kW,分布式 467 万 kW,年发电量约 250 亿 kW·h,同比增长超过 200%。2015 年,我国新增装机创历史新高,达 15 GW,连续三年新增装机超过 1 000 万 kW,累计装机约 43 GW,累计装机容量超过德国,跃居世界首位。根据国家能源局 2012 年颁布的《太阳能发电发展“十二五”规划》,到 2015 年底,太阳能发电装机容量达到 2 100 万 kW 以上,年发电量达到 250 亿 kW·h,重点在中东部地区建设与建筑结合的分布式光伏发电系统,建成分布式光伏发电总装机容量 1 000 万 kW。而截止到 2014 年底,光伏发电累计装机容量 2 805 万 kW,太阳能发电装机容量这一目标已提前实现,表明我国光伏市场蕴藏了巨大的发展潜力(贾科华,2015;国家能源局,2016)。

《太阳能发电发展“十二五”规划》极大地肯定了城市建筑光伏这一利用形式,为我国城市建筑光伏的发展创造了良好的政策环境。城市建筑和光伏的有机结合,是目前光伏建筑一体化发展的新趋势,为光伏产业的蓬勃发展注入新的源动力,也开辟了新的光伏应用领域,是近年来太阳能发电的一个新概念和热点。目前建筑与工业、交通运输并列为中国三大高能耗行业。根据住房与城乡建设部的统计,1993 年中国建筑耗能仅占全社会能耗总量的 16%,2013 年这一数据已经上升至 35%以上。此外,中国单位建筑面积采暖能耗相当于气候条件相近发达国家的 2~3 倍,如果不采取有力措施,到 2020 年中国建筑能耗将是现在 3 倍以上(清华大学建筑节能研究中心,2012)。因而,建筑节能对中国实现节能减排意义重大。而我国城镇化的进程还没有完成,预计最终将有 5 亿以上农民转化为城市人口,能耗也将进一步提高。城市人口的增加,城市经济的发展,带来了建筑规模的迅速扩大,这也使建筑能耗快速增加。而我国的建筑绝大多数不是节能建筑,以往人们的追求是居者有其屋,随之而来的是更加注重生活质量,在住房面积不断扩大的同时,各种家电纷至沓来。这就加剧了能源消耗,加重了建筑节能的任务。建筑节能虽然形势严峻,但也面临着前所未有的机遇,有着广阔的发展空间。

二、太阳能资源开发利用存在的问题

太阳能资源虽然具有上述几方面常规能源无法比拟的优点,但作为能源利用时,也有以下缺点:

(1)分散性:到达地球表面的太阳辐射的总量尽管很大,但是功率密度很低。北回归线附近,在夏季天气较为晴朗的情况下,正午时太阳辐射的辐照度最大,在垂直于太阳光方向单位面积上接收到的太阳能平均约 1 000 W;若按全年日夜平均,则只有 200 W 左右。而在冬季大致只有一半,阴天一般只有 1/5 左右,这样的功率密度是很低的。因此,在利用太阳能时,想要得到一定的转换功率,往往需要面积相当大的一套收集和转换设备,造价较高。

(2)不稳定性:由于受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制以及晴、阴、云、雨等随机因素的影响,所以,到达某一地面的太阳辐照度既是间断的又是极不稳定的,这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源,从而最终成为能够与常规能源相竞争的替代能源,就必须很好地解决蓄能问题,即把晴朗白天的太阳辐射能尽量贮存起来以供夜间或阴雨天使用,但目前蓄能也是太阳能利用中较为薄弱的环节之一。

(3)效率低和成本较高:目前太阳能利用的发展水平,有些方面在理论上是可行的,技术上也是成熟的。但有的太阳能利用装置,因为效率偏低,成本相对较高,总的来说,经济性还不能与常规能源相竞争。在今后一段时期内,太阳能利用的进一步发展将主要受到经济性因素的

制约。太阳能利用中的经济性问题,必须考虑下列两种因素:第一,世界上越来越多的国家认识到一个能够持续发展的社会应该是一个既能满足社会需要,而又不危及后代人生存的社会。因此,尽可能多地用洁净能源代替高含碳量的化石能源,是能源建设应该遵循的原则。随着能源形式的变化,常规能源的贮量日益下降,其价格必然上涨,而控制环境污染也必须增大投资。第二,我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,煤炭约占商品能源消费结构的 76%,已成为我国大气污染的主要来源。大力开发新能源和可再生能源的利用技术将成为减少环境污染的重要措施。能源问题是世界性的,向新能源过渡的时期迟早要到来。从长远看,太阳能利用技术和装置的大量应用,也必然可以制约化石能源价格的上涨。

三、相关领域的研究进展

(一)太阳能资源评估

国内外研究人员针对太阳能资源详查和评估已经开展并取得了许多重要成果,研究大多数是利用与太阳总辐射量紧密相关的气象要素(如日照百分率、云量等)进行太阳总辐射量的气候学推算。对某地的太阳能资源评价最基本的任务就是计算到达该区域内地面上的太阳辐射量。就我国而言,目前的太阳能资源评估主要采用以下三类方法:

(1)直接利用地面观测资料进行评估。

中国大约有 2 400 个普通气象站,但能同时记录太阳总辐射、直接辐射和散射辐射数据的观测站点仅 17 个,占比仅为 0.7%。显然,仅使用地面观测的辐射数据很难满足各行业对太阳能数据的需求。

(2)基于其他地面气象要素观测资料的气候学推算。

由于我国现有地面辐射观测网络分布稀疏,难以进行充分有效的评估,因此需要根据其他地面观测要素进行太阳能资源的气候学统计推算,目前常用的是日照观测资料。中国气象局风能太阳能资源评估中心利用日照百分率与地面总辐射和直接辐射的气候学关系,结合全国 2 400 多个气象站的日照实测资料,计算了我国的太阳能资源,比较清晰地反映了我国太阳能资源的相对丰富区和一般区。新疆东南部、内蒙古西部、甘肃西部、青海和西藏大部分地区为我国太阳能资源的最丰富区,约占国土面积的 20%,四川盆地的太阳能资源相对一般;除此之外的我国其他地区太阳能资源比较丰富。这些结果为我国太阳能资源开发利用的宏观决策提供了基础。

(3)基于卫星遥感资料的统计计算和物理计算。

该类方法主要通过建立卫星测值与地面辐射量的相关关系进行计算,或根据辐射传输理论,从物理上考虑各种对太阳辐射具有削弱作用的影响因素,进而计算地面太阳辐射的物理反演方法。其最大的优点是充分利用了卫星遥感资料在空间分布方面的连续性和较高的分辨率。但卫星资料虽然空间分辨率较高,但资料时间分辨率较低,且资料年代较短,不能单独作为辐射气候评价的依据。

(二)斜面辐射建模与最佳倾角(优化设计)

太阳辐射模型是指关于计算地面或斜面所接收到的太阳辐射(总辐射、直射辐射和散射辐

射)的模型。它无论在建筑、农业,还是光伏发电,光热发电,光热利用等方面都有着十分广泛的应用,是太阳能应用的一个非常重要的基础(Yong et al., 2014)。根据太阳辐射模型应用于不同的对象和用途,以及不同的时间尺度,可分为月值模型、日值模型和瞬时值模型(一般为小时值)。由于大部分气象台站的辐射观测只有水平面总辐射量的观测记录。因此,又需要对水平面总辐射量进行分析计算,以获得水平面直接辐射和散射辐射(简称直散分离模型)。日本自 20 世纪 70 年代以来,对太阳辐射模型做了较为广泛的研究,其研究方法和结果对我国具有借鉴性。因为日本是中国近邻,地理纬度与中国相近(日本: $20^{\circ}50' \sim 45^{\circ}33'N$; 中国: $3^{\circ}58' \sim 53^{\circ}31'N$)。

在工程应用中,根据太阳东升西落的自然特点,太阳能利用设备需要倾斜放置以获得更多的能量,由此即产生了最佳倾角的确定问题。对于光伏系统设计而言,组件安装位置和倾斜角度是一个影响电站性能(效率和发电量)和经济效益的关键因素(杨洪兴,2007)。理论研究表明,影响太阳能设备最佳倾角的因素主要包括天文、地理和气象三个方面,其中前两者均可以通过理论计算精确判断,而后者则是一个多变的因素,它对最佳倾角的影响是通过大气成分改变直接辐射和散射辐射的比例而产生作用的,在直接辐射比例较高的地区,最佳倾角与当地的纬度角比较接近,而在散射辐射比例较高的地区,最佳倾角则可能比当地的纬度角降低很多。上述只是理论上的定性判断,要准确地得到一个地区的最佳倾角,尚需开展一系列有针对性的科学试验和数值计算。

国外研究人员较早开始了对倾斜面上太阳总辐射量的计算以及太阳能装置最佳倾角的研究。Liu 和 Jordan(1962)最先提出了水平面与倾斜面平均太阳总辐射量的转换计算方法,并通过该方法以求得最佳倾角值。该方法最大特点是计算简单,但认为天空散射是均匀分布,与实际情况不符。在北半球,南面天空的散射辐射要比北面天空大,会导致北半球正南朝向下斜面月平均总辐射量计算结果偏小。Yakup(2001)通过编程来计算文莱的倾斜面太阳辐射量,指出当地的集热器若按月最佳倾角设置,即 1 年改变 12 次倾角,获得的太阳辐射量可比水平安装时多 5%。Shu(2001)文献提出了光伏阵列的最佳倾角和区域内太阳辐射特性、季节和反射率等因素有关,并用实验数据对所提最佳倾角的计算方法进行了验证,之后还分析了太阳辐射、反射率和纬度等与最佳倾角的相关性。Kacira(2004)提出一种通过建立计算辐射总能量数学模型的计算倾角方案。Li(2007)建立了一种天空辐射模型,通过计算机仿真得到不同倾角和方位角下相同组件的产能,提出倾角等于当地纬度的光伏阵列接收到的年太阳辐射量最大。Cheng(2009)选择了位于北半球 14 个国家,纬度范围从 $0^{\circ} \sim 85^{\circ}N$ 的 20 个地方的光伏一体化建筑,这些建筑上的光伏阵列都是正南朝向放置,倾角设为当地纬度,使用软件 PVSYST 3.41 对这些光伏阵列的产能进行仿真计算,并和当地纬度进行了相关性分析,结果发现相关性高达 98.6%,阵列倾角可以设置为当地纬度。Francisco(2012)提出了在假设晴朗无云条件下,计算固定式光伏电池板倾角的方法研究。

国内在这方面的研究相对起步较慢,上海电力学院太阳能研究所的杨金焕(1992)教授在光伏阵列最佳倾角方面做了大量的研究,同时也是太阳能光伏系统设计方面的权威。他首先提出独立系统的光伏阵列最佳倾角需要综合考虑发电的连续性、均匀性和极大性;刘祖民(2000)指出光伏阵列最佳倾角除了要考虑连续性、均匀性和极大性之外,还要考虑经济性,务必让使用的光伏电池组件和蓄电池最少。此后,杨金焕再次撰文指出光伏阵列最佳倾角本身包含了经济性,仅与安装现场的地理位置和气象条件有关,无须顾及负载大小、光伏电池和蓄

电池容量的大小。杨金焕(2003)还提到国内大部分地区的全年最佳倾角都小于当地纬度,而且倾斜面方位角与全年最佳倾角的关系曲线类似于光伏电池的伏安特性曲线的形状,并提出了季节性负载这个概念。孙韵琳(2009)应用月平均太阳辐射量的计算模型,提出了一种采用逐步查找法确定光伏阵列最佳倾角的新方法。杨刚(2008)提出了采用计算机辅助来选取固定式光伏阵列最佳倾角的 CAD 计算方法。梁双(2012)通过建立固定式光伏阵列的出力模型,分析了光伏阵列的朝向与倾角对于能量价值和容量价值的影响,并提出了基于综合价值的光伏阵列朝向与倾角优化方法。近年来由于所采用的计算方法和原始数据各异,得到的结果也不一致。以武汉为例,申政(2009)按月进行计算,给出武汉的最佳倾角为 19° ,也有评估研究中采用的长江下游光伏阵列最佳倾角为 40° ;而采用散射辐射各向异性模型计算得到最佳倾角为 24° 。由此可以看出,目前对于最佳倾角的理论计算尚无定论,而在工程实际应用中,武汉地区阵列倾角常取为 $15^\circ \sim 20^\circ$,杨金焕(2002)给出的推荐值较为接近。

对于斜面辐射模型问题,研究人员进行有益的探讨和研究,但多是基于地面或建筑屋顶斜面辐射情况,而对于建筑墙面辐射模型研究甚少。从光伏利用角度来看,城市建筑垂直墙面(如南墙、东墙、西墙等,我国绝大多数地区北墙冬半年无太阳直接辐射,可照时间为零,夏半年可照时间也非常短不予考虑)采光面积占绝对优势。但垂直墙面辐射计算情况更为复杂,随着倾角增大,墙面反射辐射增大,研究表明在北京地区南墙面夏季反射辐射占总辐射比例高达 19%,东(西)墙冬季反射辐射部分则可达 17%,不能被简单忽略;另外朝向(方位角)的增大也会影响计算误差,研究发现当方位角偏离正南正负 90° 时,年总直射辐射计算误差高达 20% 以上(程艳斌等,2009)。

在我国以往的研究中,由于观测数据(目前国家级的业务地面辐射观测站一般只提供水平面上辐射资料,而无斜面辐射观测资料,且我国国家级的业务地面辐射观测站仅有 98 个或试验条件所限,往往局限于某一种辐射模型(其斜面直射辐射多采用几何关系近似的 Liu 和 Jordan 天空各向同性模型或是经过 Klein 修正推广的模型,散射辐射或采用同性或是 Hay 异性模型,反射辐射忽略或是直接采用同性)的理论分析或算法研究,缺乏细化的斜面直接辐射、散射辐射及反射辐射建模,多种理论模型间对比和全面系统地分析(尤其是对于墙面辐射模型更是缺乏系统性研究)(Hay, 1979;李峥嵘等,2013),以及理论与光伏发电试验对比验证,且研究中一般只有最佳倾角相对于水平面的辐射增加收益理论值而缺少光伏发电量增加收益的定量分析结果。

由于我国太阳能资源的地区差异明显且气候环境复杂多变,不同地区和气候条件下太阳能资源分布特征及光伏系统利用效率必然会有差别,只有通过不同地区实际天气条件下辐射和光伏发电量的试验观测和进一步的理论计算才能做出合理评价。

本书将利用不同下垫面特征和地理气候条件下多角度辐射观测与光伏发电对比观测试验平台、同期常规气象要素及辐射观测资料,建立适合我国分布式建筑光伏利用重点地区(中东部的武汉、上海以及华北地区的北京)的直散分离模型、光伏阵列斜面辐射(墙面辐射)计算和预报模型及地区订正系数,并结合天气类型以及 $\text{PM}_{2.5}$ 等气象环境资料,进行不同地区各模型的误差分析,对引起各模型误差的原因进行解释;并探究不同地区最佳倾角及倾角调整方案,给出理论辐射收益、实际辐射及发电量收益的定性分析和定量结果。

(三)光伏发电量(或功率)预报技术

到达大气层顶的太阳辐射基本稳定不变,可以视作常量。但是,对于人类活动的载体——地球表面而言,太阳辐射在经过大气层时,由于受到云、水汽、二氧化碳(CO_2)和臭氧(O_3)等气体和气溶胶粒子等的吸收、散射和反射作用,使实际到达地面的太阳辐射大幅减弱。太阳辐射强度是影响光伏发电系统实际输出功率变化的首要因素,而太阳辐射单位面积能量密度低,具有较大的断续性和不稳定性(Shi, 2012)。太阳辐射不仅受季节和地理因素的影响,而且与当时的云量、云状、气溶胶、大气透明度、水汽含量等密切相关。此外还受天文因素的影响,其变化具有周期性,包括日变化周期和年变化周期。对太阳辐射转化效率产生影响的还有环境因素,如温度。光伏发电系统并网运行以后,输出功率不连续、不确定,发电量的变化是一个非平稳的随机过程,会对电网产生较大的影响。对太阳辐射及光伏功率的预报不仅要考虑太阳辐射的随机性,还考虑其周期性,也意味着既需要考虑天文地理因子的影响,又要考虑气象环境因子的影响(Lorenz, 2011)。

近年来,随着并网光伏渗透率的提高,光伏系统固有的间歇性和不可控性对电力系统规划、调度、控制等带来巨大影响和挑战。因此,迫切需要对太阳辐射及光伏发电量(或功率)进行准确的预报,以提高光伏利用效率,降低旋转备用容量,保障电网的安全、稳定、经济运行。德国、瑞士、西班牙、日本等国已展开利用气象预报对光伏电站发电量或功率进行预测的研究和应用。德国 Oldenburg 大学 Lorenz et al. (2009)根据欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的未来 3 天总辐射预报数据,结合德国境内 11 个光伏电站观测资料来预报光伏发电量,经校验,在 2007 年 4 月和 7 月,光伏发电量预报的相对均方根误差分别为 39% 和 22%。西班牙 Joen 大学 Almonacid et al. (2009)采用神经网络方法,以实测的光伏组件板温、入射总辐射为输入,对应条件下实测伏安特性曲线为目标函数,利用反向传播算法 L-M 优化方法,训练多层传感器(MLP),求解出逼近实际工况的伏安特性曲线,建立了光伏发电量与总辐射、板温之间的函数关系。以 Joen 大学 19.08 kW_p 的光伏电站为例,经校验,2003 年发电量预报值与实测数据的历史相关系数高达 0.998。日本 NTT Facilities 公司 Kudo et al. (2009)根据历史天气资料和日本爱知县世博园区 330 kW_p 光伏系统发电量数据,进行多元回归分析,建立预报方程,预测未来一天 5:00—19:00 的逐时发电量,并利用“预报+实测+临近订正”的方案,降低天气预报失误对于发电量预报准确性的影响。经校验,2005 年 3 月 25 日—9 月 26 日,日均发电量预报误差为 25.6%,时均预报误差为 30.53%。Zhou(2007)先搭建一种简单的光伏电池数学模型,再引入 5 个参数来解释气象环境因素与光伏出力之间的非线性关系,该预测模型在晴天和多云天气状况下对光伏出力进行预测,有较高的预测精度,可用于工程实际。Abuella (2015)提出了一种多元线性回归模型,该预测模型在大气清晰度指数大时预测精度较高,出现转折天气时会影响模型的预测精度。

国内华北电力大学栗然等(2008)结合光伏组件数学模型和保定地区气象资料,模拟了 30 MW_p 光伏电站发电量数据,基于支持向量机回归建立的预测模型结构简单运算速度快,但是模型的输入变量未将辐射度考虑在内,这在一定程度上会影响预测模型的预测精度。代倩(2011)利用聚类分析法依据气温、湿度、风速、辐射度等气象变量将天气类型进行分类,然后将相同天气类型下的气温、湿度、风速、辐射量等气象变量作为同种类型,将其输入 BP 神经网络模型进行拟合预测,所预测结果精度较高,但众多的气象变量使得预测模型复杂化。

总体看来,国内外常用的光伏发电预报技术主要可分为如下几类:(1)基于太阳总辐射预报和光电效率转换模型的原理预报法;(2)根据光伏电站历史资料和预报因子资料以及光伏发电量资料,采用多元回归、神经网络、最小二乘法、支持向量机等统计学算法进行分析建模,再将数值模型预报结果输入的动力—统计预报法;(3)基于太阳总辐射、光伏电池及并网逆变器的电路仿真模型的仿真预报法(李芬等,2011)。

(四)国内外气象保障服务现状

1. 太阳能资源监测网与数据库建设

(1)世界气象组织(WMO)为了满足国际科研团队进行太阳辐射方面的研究,其中包括太阳能应用方面的研究,成立了世界辐射数据中心(WRDC),包括全球约1280个辐射观测站点,其中有近900个站点的观测时间超过10年。这些数据被广泛应用于气候与气候变化研究领域和太阳能资源开发利用领域。(2)欧洲太阳辐射图集(ESRA),数据来源于许多气象科研机构和国家气象观测系统,包括经过筛选的586个地面站点的月平均至逐时乃至半小时的观测资料(台站密度约1万 km^2 一个站)。资料序列长度超过10年,包括太阳总辐射、日照时数、埃斯特朗浑浊度系数及其他因子等。(3)日本气象厅在全国建有64个辐射观测站,约占全国气象站的1/4,台站密度约0.6万 km^2 一个站,其中14个有直接辐射观测。(4)美国国家再生能源实验室(NREL)和美国国家气候数据中心(NCDC)共同建立了美国国家太阳辐射数据库(NSRDB),以帮助国内业者进行太阳能资源开发利用系统的规划和选址。数据库包括了1991—2005年共1454个站点的太阳辐射逐时数据资料(包括总辐射、直接辐射和散射辐射)以及其他气象要素资料。数据质量分成3类:1类站共有221个,从1991—2005年其逐时观测资料序列完整,质量可靠;2类站共有637个,资料序列也较完整,但数据可靠性比1类站低;3类站共有596个,其资料序列中有缺测,但包括至少3年的可用数据。

2. 太阳能资源评估服务及光伏系统设计软件

(1)欧洲以欧洲太阳辐射图集(ESRA)月平均数据为基础,并结合高分辨率数字高程数据和三维空间分析开发了PVGIS系统,给出了欧洲太阳能光伏发电可开发潜力分布,可为欧洲建筑从业者和太阳能规划设计者提供基础数据和建议。(2)美国国家可再生能源实验室(NREL)采用卫星反演方法进行太阳能资源精细化评估。采用SUNY模式,结合用卫星遥感和地面观测的云量、气溶胶光学厚度、大气可降水量、反照率、气压和臭氧等资料可以给出美国绝大部分地区逐小时的纬度倾斜面总辐射(光伏资源)和法向直接辐射(聚光资源)的估计值,散射辐射则由总辐射和水平面直接辐射计算得出。(3)加拿大RETScreen清洁能源项目分析软件,包括资源评估(太阳辐射数据、环境温度、10 m风速、气压等)、不同安装和运行方式下的辐射量计算(固定安装,不同朝向和不同倾角,单轴跟踪,双轴跟踪等)、设备选型和容量计算(太阳能电池、蓄电池、系统各个环节的效率、发电量测算)、成本分析(科研、设计、设备、土建、运输、安装、运行维护、周期性投资等)、温室气体减排分析(按照IPCC标准)、财务评估(贷款、赠款、利息、税收、CDM、光伏电价测算、IRR、现金流、资金回收期等)、敏感性分析和风险分析。(4)瑞士日内瓦大学能源课题组开发的PVSYST专业软件,可用于并网型、离网型、光伏水泵等多种光伏系统设计以及对光伏系统发电量的模拟计算。

3. 太阳辐射及光伏发电功率预报

根据预报时间尺度划分,目前太阳辐射预报方式可分为:超短时(1小时以内)和短时临近