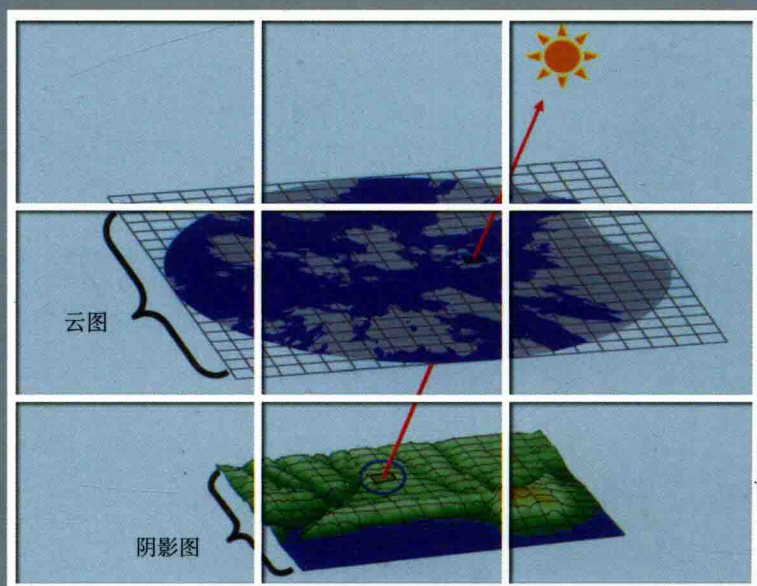


| 新能源科技译丛 |

太阳能资源预报与评估

(美) 扬·克莱斯尔 编著
李法民 鞠明 译



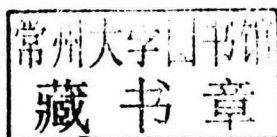
中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

新能源科技译丛

太阳能资源预报与评估

(美) 扬·克莱斯尔 编著

李法民 鞠 明 译



中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能资源预报与评估/ (美) 扬·克莱斯尔著; 李法民, 鞠明译.
— 北京: 中国三峡出版社, 2017. 1

书名原文: Solar Energy Forecasting and Resource Assessment

ISBN 978-7-80223-979-1

I. ①太… II. ①扬…②李…③鞠… III. ①太阳能-利用
IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 174209 号

This edition of Solar Energy Forecasting and Resource Assessment
by Jan Kleissl is published by arrangement with
ELSEVIER INC., of 360 Park Avenue South,
New York, NY 10010, USA

由 Jan Kleissl 创作的本版 Solar Energy Forecasting
and Resource Assessment 由位于美国纽约派克大街南 360 号,
邮编 10010 的爱思唯尔公司授权出版
北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2017-7289 号

责任编辑: 祝为平

中国三峡出版社出版发行
(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)
电话: (010) 57082566 57082640
[http: //www. zgsxcbs. cn](http://www.zgsxcbs.cn)
E-mail: sanxiaz@sina.com

北京环球画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销
2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 23.5
字数: 480 千字
ISBN 978-7-80223-979-1 定价: 98.00 元

前 言

太阳能是世界上公认的发展最快的能源产业。随着太阳能技术的稳步发展,成本与效率方面的障碍也逐渐消除,然而太阳能的变化性和可靠性又成为公众关心的话题。太阳能项目的开发者及其出资人越来越关心资源长期预测的准确性。同样,电网运营商也越来越关心短期发电量的变化。这些问题的存在使太阳能资源的预测和评估变得至关重要。然而,目前尚没有一篇文章对该领域进行过全面的论述。本书综合了业内、学术界和国际公认的研究成果对这一问题进行了论述。这些成果体现了研究者致力于将基本的科学理论知识应用于实际的行业需求中,并秉承技术发展带动学科进步的思想。本书旨在成为太阳能预测和资源评估方面的权威著作。

本书面向的读者群包括在公共用电、可再生能源行业和其他与能源相关的领域,以及大气科学和气象领域工作的科学家和工程师,尤其是太阳能方面的专业人员,包括研究人员、项目开发者、系统运营商、设计者和工程师以及太阳能项目的投资人和出资人。本书是唯一一本专门涉及太阳能资源盈利性和短期变化预测和评估的书籍,可以让读者全面了解该领域的最新发展状况。

第2章和第3章论述了利用卫星观测云层和大气气溶胶对地面太阳辐射进行反演的半经验方法和物理方法。卫星反演的太阳能资源数据大有取代地面观测之势,或至少是地面观测的一种补充。第4、5、6、7章分别论述了太阳能项目的金融风险、太阳辐射资源时空变化特征、资源变化性对发电的影响。

在一定时间间隔内对太阳能资源进行预测对电网管理非常重要,太阳能资源预测是研发方面的一个活跃领域。第8章概述了太阳能预测方法和评价标准。第9章描述了基于地面全天空成像仪观测云图的短期太阳能资源预测。第10章和第11章描述了美国和欧洲电网运营商使用的基于卫星数据的 hour-ahead 预测法。

第 12、13、14 章论述了适用于 day-ahead 太阳能预测的数值天气预报 (NWP) 模型的背景场、资料同化和案例研究。第 15 章论述了用于改善所有太阳能资源预测结果的随机学习方法。

在此感谢所有提供帮助的人和我的赞助者（加州公共事业委员会、加州能源委员会、松下公司和美国能源部）以及支持“从实验室到市场”这一研究理念的大学生和博士生。但愿在我们共同的努力下，使大量的太阳能资源以经济高效的方式并入电网。

人物简介

Tomas Cebecauer 是太阳能资源评估、卫星遥感、地球空间信息科学、气象学和光伏发电建模方面的专家，地理和地理信息专业的博士，发表过 70 多部合著的科学书刊。他是 PVGIS 在线决策支持系统的创建者之一。该系统对欧洲光伏产业的发展产生了极大贡献。他是 GeoModel Solar 公司的技术总监，是推动 SolarGIS 全球在线系统技术发展和运行的关键人物。SolarGIS 系统用于发布太阳能资源和气象数据，并为太阳能规划、监控和预测提供软件服务。Tomas Cebecauer 是在该系统中运行的高精度卫星反演辐射模型的主要策划者。他致力于与世界领先专家合作，共同开发太阳能资源建模、数据质量控制和全球实时传输方法。

Chi Wai Chow 是 Kleissl 教授的太阳能资源评估和预测实验室的一名博士生，专门研究用于全天空图像运动检测和分割的计算机可视化工具。

Carlos F. M. Coimbra 是加州大学圣地亚哥分校机械和航空航天工程系的一名副教授。Coimbra 指导加州地区多所大学的太阳能预测行动。在太阳能预测行动中，他管理着分散在太平洋沿岸的一个高质量的太阳观测台网络。Coimbra 在太阳负荷综合预测方面的研究旨在开发出随机学习与基于物理模型相结合的方法。他在加州大学圣地亚哥分校教授辐射传输、热力学和试验方法课程。他在该校的研究项目由 NSF、CEC、CPUC、CITRIS 和 DOD 提供赞助。

Craig Collier 于 2004 年取得了美国德州农工大学大气科学专业的博士学位，在加利福尼亚州拉霍亚的斯克里普斯海洋研究所大气科学中心完成其博士后研究工作。在这之后，他于 2007 年进入 GL Garrad Hassan 公司。过去的 5 年间，他管理公司在北美市场的短期预测业务，指导了一个由大气科学家和工程师组成的跨专业团队。该团队针对公共事业部门、独立发电商、能源贸易商和系统运营商，提供不同设备和各种地形及气象状况的预测服务，其中包括美国五大风力发电厂中的两个发电厂。Collier 博士是美国气象学会、美国地球物理联合会、美国风能协会、美国太阳能协会和公共事业可再生能源发电综合组织的成员。

Steven J. Fletcher 是科罗拉多州立大学大气联合研究所 (CIRA) 的 III 级研究员。2004 年以来，他一直从事非高斯集合变分数据同化方面的研究。自 2010 年起，他在美国地球物理学会的年度秋季会议中组织了一场有关非线性和非高斯数据同化的专题会。除了非高斯数据同化之外，Fletcher 博士的研究领域还涉及数据融合、预

处理、控制变量变换和背景误差建模。他于2004年取得了英国雷丁大学数学专业博士学位，在该校就读时的博士研究方向为数据同化中的高阶非线性平衡分解。

Mohamed Ghonima 是加州大学圣地亚哥分校机械和航空航天工程系的一名博士生。Mohamed 的研究方向是使用地基全天空成像仪进行云检测和气溶胶特性描述的图像处理技术。他在加州大学圣地亚哥分校全天空成像仪硬件开发方面也有着丰富的经验。Mohamed 于2011年荣获了英国石油公司的绩效奖。

Catherine N. Grover 在能源产业（包括可再生能源、石油和天然气）已有近20年的工作经验。她在管理和领导电力、能源项目开发、融资咨询、独立工程服务方面也有着丰富的实践经验。目前，Grover 女士是 Luminare 有限责任公司太阳能业务的负责人。她获得了塔尔萨大学化学工程专业学士（荣誉）学位。

Andrew K. Heidinger 是威斯康辛州麦迪逊市气象卫星合作研究所（CIMSS）NOAA/NESDIS 卫星应用和研究中心的物理学家。他还担任威斯康辛大学大气与海洋科学系的副教授。Heidinger 博士的研究方向主要是面向历史、当前和未来遥感器的云遥感技术。他出版过有关卫星标定和辐射传输模型方面的刊物。他获得了普渡大学机械工程专业学士学位，以及科罗拉多州立大学大气科学专业硕士学位和博士学位。

Detlev Heinemann 是一名气象工作者，也是奥尔登堡大学能源和半导体研究实验室能源气象学组的组长。能源气象学组的研究重点是，在太阳能和风能提供的能源有限的条件下，研究天气和气候对能源供应系统的影响。在该领域，Heinemann 博士的研究方向是风能和太阳能预测，各种规模的风资源模拟和基于卫星的地面太阳辐射评估。他管理过多个与能源气象学有关的国家和国际研究项目。他于1983年获得了基尔大学气象学专业的学位证书，1990年获得奥尔登堡大学物理专业博士学位。

Tomas E. Hoff 是清洁能源研究公司的创始人，也是该公司研究和咨询组的主席。Tom 的研究经证明对公用事业部门和 ISO 至关重要。公用事业部门和 ISO 要在不断提高光伏并网发电水平的同时维持光伏发电的可靠性，这对他们来说是一项挑战。Tom 的研究课题众多，其中包括：光伏和分布式发电评价、风险管理和可再生能源，以及最近研究的光伏发电量变化性的描述方法。Tom 在太平洋燃气与电力公司开始其职业生涯。他获得了斯坦福大学工程学院工程经济系统专业博士学位。

Andrew S. Jones 是科罗拉多州立大学大气联合研究所（CIRA）的一名高级研究员。他曾6次获得学术奖学金，并在卫星数据同化、多用传感器-卫星数据融合技术、卫星空间滤波器、卫星反演土壤湿度、辐射边界条件、微波探测云液态水和陆面上空表面特性等领域发表过380余篇论文、报告和文章。Jones 博士是多个卫星数据同化和先进的数据处理项目的负责人。他在东伊利诺伊大学获得了物理专业学士学位，同时他还辅修数学，并以最优异成绩毕业，同时还取得了科罗拉多州立大学大气科学专业硕士学位和博士学位。

Jan Kleissl 是加州大学圣地亚哥分校机械和航空航天工程系的一名副教授，也是能源研究中心的副主任。Kleissl 取得了美国约翰霍普金斯大学环境工程专业博士学位，并于 2006 年进入加州大学圣地亚哥分校。Kleissl 带领 16 名博士生从事由 CPUC、CEC、NREL 和 DOE 赞助的太阳能预测和太阳能并网研究项目。Kleissl 讲授可再生能源气象学、流体力学和实验室技术方面的课程。Kleissl 于 2009 年荣获国家科学基金会事业奖以及 2008 年加州大学圣地亚哥分校的可持续发展奖。

Ben Kurtz 是加州大学圣地亚哥分校机械和航空航天工程系的一名博士生。Ben 当前的研究方向是使用地基全天空成像仪进行太阳能预测。Ben 在加利福尼亚理工学院获得了物理专业学士学位。

Jan Kühnert 是奥尔登堡大学能源和半导体研究实验室能源气象学组的研究生。他于 2011 年取得了物理专业学位证书。他的博士论文选题是能源市场光伏发电预测，并受到了德国联邦环境基金会奖学金计划的资助。

Matthew Lave 是桑迪亚国家实验室的一名高级技术人员，在光伏并网部门工作。Matthew 在加州大学圣地亚哥分校获得了航空航天工程专业博士学位。在校期间，他的研究方向是太阳能辐射和太阳能光伏发电量变化性分析。读博期间，Matthew 开发出了微波变化性模型（WVM）。该模型可以仅使用辐照度作为数据来源，模拟太阳能光伏发电量的变化在各个时段影响电网运行的情况。他目前正致力于太阳能变化对电网及光伏系统建模方面的影响研究。

Vincent E. Larson 是一名拥有 13 年工作经验的大气科学家，他的研究领域主要是云的数值建模，曾发表过 30 篇经同行审阅的论文。Larson 获得了麻省理工学院的博士学位和耶鲁大学物理专业学士学位。

Elke Lorenz 是奥尔登堡大学能源和半导体研究实验室能源气象学组的成员。她的研究方向是太阳辐照度和光伏发电预测，以及根据卫星数据反演太阳辐照度的方法。自 2011 年初，Lorenz 博士一直担任能源气象学组太阳能小组组长。她在奥尔登堡大学获得了物理专业学位证书。在校期间，她还完成了关于将卫星图像云层运动矢量用于短期太阳辐射预测的博士论文。

Ricardo Marquez 2012 年取得了加利福尼亚大学美熹德分校博士学位。在校期间，他在 Coimbra 教授的指导下，开发出了多个不同时间尺度的太阳能预测方法。目前，他是加利福尼亚大学美熹德分校的博士后，继续从事辐射传热方面的研究工作。Marquez 博士的研究受到了美国国家科学基金会、加州能源委员会、社会利益信息技术研究中心（CITRIS）、Eugene Cotta-Robles 和南加州艾迪生公司奖学金的资助。

Patrick Mathiesen 是加州大学圣地亚哥分校的一名博士生，也是 Jan Kleissl 太阳能资源评估和预测实验室的成员。他的研究领域包括数值天气预报和气象学在可再生能源产业的应用。Mathiesen 于 2009 年取得了明尼阿波里斯市明尼苏达大学机械工程专业学士学位。

Andrew C. McMahan 是 Luminate 有限责任公司的经理，负责提供太阳能项目开发 and 融资方面的咨询服务。他在太阳能产业已有近十年的工作经验，曾是 SkyFuel 公司（抛物面槽式聚光太阳能发电技术的初创公司）联合创始人和副总裁。McMahan 获得了俄勒冈州立大学机械工程专业学士学位和威斯康辛大学麦迪逊分校机械工程专业硕士学位。

Steven D. Miller 是科罗拉多州立大学大气联合研究所（CIRA）的卫星气象学家。他的研究方向是卫星遥感和卫星气象应用。他的工作对象是各式各样的无源和有源卫星数据集。他的具体专业是设计基于物理的附加值产品，其中涉及矿尘、火山灰、云特性、雾检测、火灾探测、夜间微光成像。Miller 博士是卫星数据集用户的应用研究联络员。他获得了加州大学圣地亚哥分校电子与计算机工程专业学士学位和科罗拉多州立大学大气科学专业硕士学位和博士学位。

Dung (Andu) Nguyen 是加州大学圣地亚哥分校机械和航空航天工程系的一名博士生。Andu 于 2011 年取得了美国天主教大学电子工程专业学士学位和硕士学位。Andu 的研究方向包括太阳能预测、配电系统电力模拟、可再生资源 and 存储系统并网的控制理论以及可再生能源经济学。他当前的研究项目有：使用全天空成像仪进行短期太阳能预测，高光伏渗透率对配电系统的影响。

Hugo T. C. Pedro 是加州大学圣地亚哥分校 Coimbra 的太阳能预测引擎小组的博士后成员。他负责开发随机学习和模型识别方法，并将这些方法用于研究小组的研究和预测工作中。Pedro 博士主攻演进优化和模型识别。他开发出了多个适用于太阳辐照度图像处理和时序分析、电源输出和需求负荷的方法。Pedro 博士在 2010 年取得夏威夷大学马诺阿分校的博士学位后不久就加入了 Coimbra 教授的太阳能预测引擎小组。他的研究工作受到了美国国家科学基金会的资助。

Richard Perez 是纽约州立大学阿尔巴尼分校大气科学研究中心的一名研究教授，他的应用研究领域是太阳辐射、太阳能应用和采光。他在巴黎大学和纽约州立大学阿尔巴尼分校分别取得了大气科学专业硕士和博士学位以及法国尼斯大学的工学学士学位。他在太阳能领域的显著贡献有：

- 发现了光伏发电的巨大潜力，可以满足非传统太阳能地区的电力需求，如美国东北部大城市。
- 发展了太阳辐射传输模型，并且这些模型已广泛应用于理想条件和实际条件下的太阳能计算中。

Perez 是乔治·华盛顿大学，乔治·华盛顿太阳能研究所咨询委员会的成员。

他是美国太阳能协会（ASES）理事会多届连任成员。他已撰写了 250 多篇文章，包括书籍的部分章节、期刊论文、会议论文和技术报告。他在光伏系统负荷管理方法方面获得了两项美国专利。他负责过多个研究项目 and 价值达 600 万美元的合同。他荣获了多个国际奖项，包括美国能源部（USDOE）颁发的“杰出研究证书”、美国太阳能协会（ASES）的最高奖项“查尔斯·格里莱·艾博特奖”，以及丹麦哥

本哈根威卢克斯基金会颁发的“国际建筑和日光一等奖”。

Manajit Sengupta 是美国科罗拉多州戈尔登市国家可再生能源实验室的一名高级研究员。他目前致力于太阳能各个方面的研究,包括太阳能资源、预测和变化性。Sengupta 博士的专业领域包括辐射传输、基于陆地和卫星系统的云遥感以及卫星数据同化。他获得了加尔各答学院物理专业学士学位和宾夕法尼亚州立大学气象学博士学位。

Joshua Stein 是桑迪亚国家实验室的一名杰出研究员,致力于光伏发电和并网方面的研究。Stein 博士是自然和工程复杂系统建模和分析方面的专家,包括使用随机方法评估不确定性和敏感性。他目前正在开发和验证太阳辐照度、光伏系统性能、可靠性和光伏与电网的相互作用模型。他是光伏性能建模合作组织 (<http://pvpmc.org>) 的负责人。他在加利福尼亚大学圣克鲁兹分校获得了地球科学专业博士学位。

Tom Stoffel 是一位大气科学家,在太阳辐射测量领域拥有 37 年的研究经验,参与了太阳辐射研究实验室的设计、开发和运营。该实验室提供经 ISO 17025 认证的日射强度计和太阳热量计校准服务,并为 NREL 的检测技术及仪器仪表数据中心提供支持,在美国境内提供近乎实时的太阳能资源数据 (www.nrel.gov/midc)。他最初在赖特-帕特森空军基地推进实验室担任航空工程师,从事燃气涡轮发动机性能和红外辐射特征的模拟工作。随后,他重新回到学校进修辐射传输和大气科学专业。毕业后,他加入了现在的 NOAA 地球系统研究实验室,从事太阳辐射城乡差异方面的分析工作。1978 年,他进入了太阳能研究所(现改名为 NREL),开始从事可再生能源领域的研究。过去的 13 年间,他管理了一个技术团队,该团队负责太阳能资源数据的收集、评估和发布。他目前的研究课题包括太阳能发电的变化性、通过卫星遥感表面辐照度对太阳资源特性进行描述、太阳能发电预测、提高可再生能源领域的太阳辐射测量和计量水平以及气候变化研究。他在这些领域发表过 85 篇科技论文,并为国家和国际研究项目提供专业技术支持。

Marcel Šúri 是太阳资源评估、光伏发电建模和太阳能技术性能评估方面的专家。他获得了地理与地理信息科学专业博士学位,与人合著了 100 余篇科技著作。Marcel Suri 是在 PVGIS 线决策支持系统的创始人之一,该系统对欧洲光伏产业的发展产生了极大贡献。

他是 GeoModel Solar 公司的总经理。GeoModel Solar 公司是全球在线系统 SolarGIS 的运营商,该系统为太阳能规划、监控和预测提供高精度的太阳资源信息、气象信息和软件服务。Marcel Suri 为太阳能发电厂开发者和运营商、投资者、银行和政府机构提供咨询服务。他管理过多个研发项目,积极参与标准的制定和市场实施,提高太阳能行业的透明度和效率。

Bryan Urquhart 是加州大学圣地亚哥分校机械工程专业的博士生,从事太阳能资源方面的研究,重点研究领域是利用天空成像仪进行太阳能短期预测。在这之前,

他曾使用地球同步卫星数据估算加利福尼亚州的太阳辐射度作为其硕士论文研究课题。除学术研究之外，Bryan 曾在航空航天公司工作数年，协助飞行系统和地面系统红外化学云探测设备的设计和制造。

Frank E. Vignola 积极参与能源研究 30 余年。他在俄勒冈大学太阳能中心担任高级研究助理和主任，并同时提供咨询服务。Vignola 博士曾在众多公用事业的电力项目中协助太阳能资源和发电量预测验证工作。他是美国太阳能协会（ASES）的成员，获得过俄勒冈州太阳能行业协会的太阳能遗产奖。他获得了俄勒冈大学物理专业博士学位。

目 录

第1章 术语和定义	1
1.1 简介	1
1.2 太阳能发电方式概述	2
1.2.1 光伏	2
1.2.2 聚光太阳能发电	6
1.3 太阳能与太阳辐照度	8
1.4 太阳直射、散射和总辐射及仪器测量	8
1.5 影响太阳辐照度的大气特性	10
参考文献	15
第2章 半经验卫星反演模型	18
2.1 卫星和光谱	18
2.2 基本原理	20
2.3 晴空辐照度	21
2.4 云消光: 云指数	25
2.5 总辐照度的计算	28
2.5.1 校正非均匀地形上的动态范围	29
2.5.2 积雪	29
2.6 太阳直接辐照度的计算	32
2.7 利用高分辨率地形信息对太阳辐照度进行降尺度	32
2.8 不确定性来源	33
2.9 检验与准确性	35
2.10 利用地面测量值校准卫星偏差	37
2.11 未来发展	37
参考文献	38
第3章 卫星物理反演法	43
3.1 简介	44
3.2 卫星观测系统	46
3.3 云层、气溶胶的探测和属性特征	49

3.3.1 云层	49
3.3.2 气溶胶	52
3.4 建立属性与地表辐射参数的相关性	52
3.4.1 一步法	53
3.4.2 两步法	54
3.5 操作和数据集实例	55
3.5.1 国际卫星云气候计划	55
3.5.2 NASA 全球地表辐射收支	55
3.5.3 Heliosat 计划	56
3.5.4 NOAA 项目	56
3.6 未来的卫星性能	58
3.7 研究的关键需求	60
3.7.1 短期预测的三维效应	61
3.7.2 卫星反演云产品在 NWP 分析中的改进使用	62
3.7.3 模拟与观测的融合	63
3.8 结论	63
参考文献	64
第4章 太阳能项目融资中的资源风险评估	70
4.1 简介	70
4.2 项目融资中的资源风险研究	71
4.3 数据源、质量及不确定性	72
4.3.1 地面测量、地面建模及卫星数据源	73
4.3.2 记录年限和变化性	74
4.3.3 对比和校准不同时空的太阳能数据集	75
4.3.4 数据不确定性	75
4.4 资源变化性的商业影响	75
4.4.1 价格的波动	76
4.4.2 交付要求和容量电价	76
4.4.3 预测要求	77
4.5 量化和管理资源风险的技术	77
4.5.1 超越概率统计	77
4.5.2 能源预测的变化因素	79
4.5.3 敏感度和压力/不利情况	80
4.5.4 债务规模和偿债能力比率	80
4.6 结论	80
参考文献	81

第5章 可获利的太阳辐射数据集	82
5.1 简介	83
5.2 太阳辐射数据集：特征、优势与劣势	84
5.2.1 SOLMET/ERSATZ 数据库	85
5.2.2 美国国家太阳能辐射数据库	86
5.2.3 加拿大气象资源与工程数据集	89
5.3 典型气象年（TMY）数据文件	91
5.3.1 TMY2 和 TMY3 文件的局限性	92
5.4 卫星反演太阳辐射值	94
5.4.1 源自卫星图像的辐照度	94
5.4.2 静止卫星	95
5.4.3 卫星建模辐照度模型准确性	96
5.4.4 NASA/SSE 数据库	97
5.4.5 卫星数据准确性与状态的讨论	97
5.5 辐照度测量值与不确定性	99
5.5.1 高质量 DNI、GHI 和 DHI 测量值	99
5.5.2 旋转遮光带辐射计	101
5.5.3 维护与校准的重要性	101
5.5.4 卫星数据和地基数据融合值	102
5.5.5 其他重要的气象测量值	103
5.6 建立可获利的数据集	103
5.6.1 可获利数据集的目标	103
5.6.2 创建可获利数据集的步骤	104
5.6.3 NASA/SSE 数据与地基测量值	105
5.7 P50、P90 和 P99 条件下的太阳辐射数据集统计分析	105
5.7.1 P50、P90 和 P95 的用途	106
5.7.2 年辐照度分布	106
5.7.3 长期数据的要求	107
5.8 现状与前景	107
参考文献	108
第6章 太阳能资源的多变性	112
6.1 前言	112
6.2 太阳能多变性的量化	114
6.3 色散平滑效应	114
6.4 任意分布的太阳能发电集群的一般情况	120
6.5 多变性对配电和传输系统的影响	121

6.6 平滑效应结语 124

参考文献 124

第7章 利用辐照度数据量化并模拟太阳能电站的多变性 128

7.1 光伏发电多变性的原因与影响 128

7.2 多变性度量 130

7.2.1 缓变率 130

7.2.2 晴空指数 130

7.2.3 小波分解 132

7.2.4 变率减少 133

7.3 基于小波变换的变异模型 135

7.3.1 WVM 模型流程 136

7.3.2 观测点之间的相关性 137

7.3.3 WVM 模型应用 138

7.4 WVM 模型及其在波多黎各的应用 138

7.4.1 验证：铜山 48MW 电站 138

7.4.2 波多黎各电力局（PERPA）10% 缓变率技术要求 140

7.4.3 圣地亚哥、瓦胡岛和波多黎各之间的多变性对比 144

7.5 小结 146

参考文献 146

第8章 太阳能预测方法与准确性评估标准概述 148

8.1 太阳能预测方法分类 148

8.2 确定性和随机性预测方法 152

8.2.1 物理预测方法的关键性评价 152

8.2.2 卫星预测 153

8.2.3 全天空成像仪预报 154

8.2.4 随机学习方法的数据输入 154

8.2.5 小结 156

8.3 太阳能预测模型准确性评价标准 156

8.3.1 太阳能资源的变化性 156

8.3.2 常见模型评价的标准 157

8.3.3 固定时效（THI）的评价标准 159

8.4 利用 THI 衡量标准评估持续性，以及非线性自回归预测模型 161

8.4.1 NAR 预测模型和 NARX 预测模型 161

8.4.2 预测模型与持续性对比 161

8.4.3 卫星云图运动预测模型对比 164

8.5 总结 164

参考文献	165
第9章 基于全天空成像仪的短期预测	168
9.1 短期太阳能预测所面临的挑战	169
9.2 应用程序	169
9.2.1 公共事业规模的太阳能设施	169
9.2.2 分布式光伏系统	170
9.2.3 光伏与蓄电池联合	170
9.3 天空成像系统硬件	170
9.3.1 基于地面图像预测的组件	170
9.3.2 天空数码摄影历史回顾	172
9.3.3 加州大学圣地亚哥分校天空成像仪的光学系统与成像系统设计	174
9.3.4 高动态范围成像	177
9.4 天空成像分析技术	178
9.4.1 云检测与不透明度分类的图像加工技术	179
9.4.2 利用立体摄影确定云底高度	181
9.4.3 云速估计	186
9.5 案例分析:铜山	186
9.5.1 实验装置	186
9.5.2 预测方法	188
9.5.3 利用天空成像预测发电量	190
9.5.4 误差度量	191
9.5.5 预测性能	192
9.5.6 总结	194
9.6 未来应用	194
9.6.1 云光学性质反演	195
9.6.2 多云层检测与追踪	195
9.6.3 三维云场重建	196
9.7 结束语	196
参考文献	196
第10章 SOLARANYWHERE 预测	202
10.1 太阳能资源和预测数据服务	202
10.1.1 历史数据	202
10.1.2 预测数据	203
10.2 SOLARANYWHERE 预测模型	204
10.2.1 短期云层运动矢量预测	204
10.2.2 数值天气预报预测	205

10.3 模型评估：标准分辨率	206
10.3.1 单点地面实况验证	206
10.3.2 扩大区域的验证	222
10.3.3 NWP 太阳能预测模型的相互比较	225
10.4 性能评估：1km、1min 预测	226
结束语	228
参考文献	228
第 11 章 德国能源市场的卫星辐照度和发电预测	231
11.1 德国太阳能市场份额	232
11.2 卫星预测过程综述	234
11.3 源自卫星数据的辐照度	234
11.3.1 Meteosa 卫星	234
11.3.2 Heliosat 方法	235
11.4 云层运动矢量	236
11.4.1 云层运动的探测	236
11.4.2 模型参数的测定	238
11.4.3 运动外推法得出的预测	239
11.4.4 后处理：平滑处理	239
11.5 评估	240
11.5.1 评估标准和周期	240
11.5.2 参考预测：ECMWF 和持续性预测	241
11.6 CMV 预测的评估	242
11.6.1 单站点预测	242
11.6.2 区域预测	245
11.6.3 误差的特征	248
11.7 光伏发电预测	254
11.8 总结与展望	255
参考文献	256
第 12 章 数值天气预报模型的太阳辐照度预测	259
12.1 简介	259
12.2 生成 NWP 预测和网格分辨率所需的步骤	260
12.2.1 确定大气初始状态和网格分辨率	260
12.2.2 统计后处理	261
12.3 4 种应用模型（ECMWF、NAM、GFS、RAP）的配置对比：空间和时间覆 盖率、深厚积云和浅积云、湍流输送、云量、云垂直重叠、层状微物理学、 气溶胶、短波辐射传输	261