



“十二五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

*Technologies on Wind Power and  
Photovoltaic Power Generation Forecasting*

丁杰 周海 等 编著

**风力发电和光伏  
发电预测技术**



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
新能源发电并网技术丛书

丁杰 周海 等 编著

# 风力发电和光伏 发电预测技术



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书从电力系统持续发展的需求与风力发电和光伏发电功率预测技术的发展趋势出发,选择了一些近年来发展迅速且备受广大科研工作者和工程技术人员关注的重要研究领域,力求突出重要的学术意义和实用价值。书中分别介绍了风力发电和光伏发电预测技术的发展、风力发电和光伏发电特性、气象监测技术、数值天气预报技术、短期功率预测技术、超短期功率预测技术及风力发电和光伏发电功率预测系统。希望本书的出版能够促进我国风力发电和光伏发电预测技术的研究和应用,充分发挥预测系统在智能电网中的重要作用,推动预测技术的产业化快速发展。

本书对从事相关领域的研究人员、电力公司技术人员、风力发电和光伏发电预测系统研发人员具有一定的参考价值,也可供新能源领域的工程技术人员借鉴参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力发电和光伏发电预测技术 / 丁杰等编著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2016. 1  
(新能源发电并网技术丛书)  
ISBN 978-7-5170-4108-5

I. ①风… II. ①丁… III. ①风力发电—预测技术②太阳能发电—预测技术 IV. ①TM614②TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第026934号

审图号: GS (2016) 96 号

书 名	新能源发电并网技术丛书 <b>风力发电和光伏发电预测技术</b>
作 者	丁杰 周海 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开 11.75印张 258千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
定 价	<b>42.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 丛书编委会

主任 丁杰

副主任 朱凌志 吴福保

委员 (按姓氏拼音排序)

陈宁 崔方 赫卫国 秦筱迪

陶以彬 许晓慧 杨波 叶季蕾

张军军 周海 周邺飞

# 本书编委会

主 编 丁 杰

副主编 周 海

编 员 (按姓氏拼音排序)

陈卫东 陈志宝 程 序 崔 方

丁 煌 谭志萍 王知嘉 于炳霞

周 强 朱 想



随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北等“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为多。光伏发电装机预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式建筑光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为了社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能

源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源的并网技术进步方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项的国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量的与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风力、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研發应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、新能源发电建模与仿真技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院在新能源发电并网领域的探索、实践和在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长：



2015年12月



风力发电、光伏发电功率预测技术是新能源发电并网中不可或缺的支撑技术，在电网优化调度、发电计划制定、电站经济运行等方面都发挥着重要作用。近年来，以风力发电、光伏发电为代表的新能源发电在我国得到了快速发展，风力发电、光伏发电自身具有波动性、随机性、间歇性，当其在电网中超过一定比例后，将对电网的控制运行和安全稳定产生风险。风力发电、光伏发电功率预测是提高风电场、光伏电站出力可预见性，为发电计划制订与电网调度提供决策支持，缓解电力系统调峰、调频压力，尽可能多地接纳风力发电、光伏发电的重要技术保障。同时，风力发电和光伏发电预测在电站发电量评估、检修计划制订以及智能运维等方面都将发挥重要作用。

2011年，国家能源局发布《风电场功率预测预报管理暂行办法》（国能新能〔2011〕177号），要求所有已并网运行的风电场应在2012年1月1日前建立风力发电预测预报体系和发电计划申报工作机制，促进开展风电功率预测。2012年，《风电功率预报与电网协调运行实施细则（试行）》（国能新能〔2012〕12号）规定了电网调度机构应该建立覆盖整个调度管辖区的风力发电功率预测系统，开展电力系统风力发电功率预测工作。这些举措都突显了功率预测技术在我国新能源开发利用中的重要性。

近年来，我国风力发电、光伏发电功率预测技术的研究逐步深入，关键技术不断取得突破，研究成果在我国风能、太阳能资源富集区域得到推广应用。《风电功率预测系统功能规范》（NB/T 31046—2013）《光伏发电功率预测系统功能规范》（Q/GDW 1995—2013）《光伏发电功率预测气象要素监测技术规范》（Q/GDW 1996—2013）等一系列标准成体系地制定颁布，有力地推动了预测技术的研究与应用。

本书研究的现有进展与国外风力发电、光伏发电功率预测技术同步，结合气象与出力特性分析、预测建模方法等关键技术的研究以及风力发电和光伏发电预测系统，详细介绍了风力发电和光伏发电特性、气象监测技术、数值天气预报技术、短期和超短期预测技术，以及风力发电和光伏发电预测技



术的实际工程应用。

本书共7章：其中第1章由崔方编写；第2章由周强编写；第3章由程序编写；第4章由丁煌编写；第5章由谭志萍和于炳霞编写；第6章由陈志宝编写；第7章由朱想和王知嘉编写。全书编写过程中得到了陈卫东、居蓉蓉、彭佩佩等同事的大力协助，全书由丁杰、周海指导完成。

本书在编写过程中参阅了很多前辈的工作成果，在此深表衷心的感谢与感谢。中国电力科学研究院新能源所的领导、专家王伟胜、吴福保、朱凌志等也对本书的编写给予了高度重视、深切关怀和精心指导，在此一并向他们致以真诚的感谢！

本书仅对目前的气象资源与出力特性、预测技术、系统应用涉及的关键问题进行系统地阐述。随着精细化数值模拟、预测模型算法、误差校正等技术的快速发展，我们将努力探索和实践，将新技术的科研成果不断地应用于生产实践，持续提升预测精度。

稳定、可靠、精度高、适用于新能源电力市场竞价的风力发电、光伏发电功率预测产品在发电调度中的应用需求越来越迫切，随着我国风力发电和光伏发电产业的持续高速发展、规模扩大，我们的研究与实践将任重道远。

限于作者水平和实践经验有限，书中难免有不足和待改进之处，恳请读者批评指正。

作者

2015年12月



序

前言

第1章 风力发电和光伏发电预测技术的发展	1
1.1 基本概念	1
1.2 研究内容	2
1.3 现状与挑战	3
参考文献	4
第2章 风力发电和光伏发电特性	5
2.1 风能资源特性	5
2.2 太阳能资源特性	10
2.3 风能、太阳能资源的时空分布	14
2.4 风力发电和光伏发电原理	19
2.5 风力发电出力特性	27
2.6 光伏发电出力特性	34
参考文献	37
第3章 气象监测技术	39
3.1 气象要素采集	39
3.2 监测站选址技术	42
3.3 监测系统设计	49
3.4 监测系统运行维护	54
参考文献	59
第4章 数值天气预报技术	60
4.1 数值天气预报基础	60
4.2 风能太阳能中尺度数值模拟	68
4.3 数值天气预报误差校正方法	73

4.4	数值天气预报业务系统 .....	78
	参考文献 .....	84
<b>第5章</b>	<b>短期功率预测技术 .....</b>	<b>87</b>
5.1	短期功率预测技术发展 .....	87
5.2	风的短期变化影响因素 .....	90
5.3	太阳辐射的短期变化影响因素 .....	93
5.4	短期风力发电功率预测 .....	96
5.5	短期光伏发电功率预测 .....	107
5.6	区域短期功率预测 .....	114
5.7	多模型组合预测方法 .....	117
5.8	短期功率预测不确定性分析 .....	118
	参考文献 .....	121
<b>第6章</b>	<b>超短期功率预测技术 .....</b>	<b>124</b>
6.1	超短期功率预测技术发展 .....	124
6.2	风的超短期变化影响因素 .....	126
6.3	太阳辐射的超短期变化影响因素 .....	127
6.4	风速和太阳辐射时序预测 .....	130
6.5	风速和太阳辐射多因子预测 .....	140
6.6	基于地基云图的太阳辐射预测 .....	148
6.7	风-功率转化模型 .....	152
6.8	辐射-功率转化模型 .....	154
6.9	超短期预测误差校正技术 .....	156
	参考文献 .....	158
<b>第7章</b>	<b>风力发电和光伏发电功率预测系统 .....</b>	<b>160</b>
7.1	系统设计 .....	160
7.2	系统结构 .....	163
7.3	应用案例 .....	167
	参考文献 .....	176

# 第 1 章 风力发电和光伏发电预测技术的发展

环境保护与可持续发展是贯穿 21 世纪全球性的重大战略方针和迫切任务。鉴于化石燃料趋于枯竭、环境污染等问题日益严峻，越来越多的国家将新能源发电，特别是风力发电和光伏发电作为缓解能源压力、改变能源结构、促进可持续发展的重要手段和长远战略。

2006 年《中华人民共和国可再生能源法》实施后，我国风力发电进入大规模发展阶段。统计数据显示，2009 年我国风电装机首次突破 1000 万 kW，至 2014 年年底累计并网装机容量达到 9637 万 kW，占全部发电装机容量 7%，占全球风电装机的 27%。与此同时，我国光伏发电的装机容量在 2014 年年底达到 2805 万 kW，同比增长 60%。如此大规模的风力发电和光伏发电接入电网，势必给电网的运行控制和安全稳定带来巨大挑战。

风力发电和光伏发电预测的重要作用在于提高风电场、光伏电站的出力可预见性，为发电计划制订与电网优化调度提供决策支持，缓解电力系统调峰、调频压力，使得电网能够在安全稳定运行的前提下，尽可能多地接纳风力发电、光伏发电。同时，风力发电和光伏发电预测在电站发电量评估、检修计划制订以及智能运维等方面都将发挥重要作用。

## 1.1 基本概念

风力发电与光伏发电预测技术具有一定的共性，即采用风电场、光伏电站的历史功率、气象、地形地貌、数值天气预报和设备状态等数据建立输出功率的预测模型，以气象实测数据、功率数据和数值天气预报数据作为模型的输入，经计算得到未来时段的输出功率值。

根据应用需求的不同，预测的时间尺度分为超短期和短期，分别对应未来 15min~4h 和未来 0~72h 的输出功率预测，预测的时间分辨率均不低于 15min。

风力发电和光伏发电预测技术具有多学科综合应用的特点，需要了解和掌握风能和太阳能资源评估、气象监测、数值天气预报、风力发电和光伏发电功率预测系统等相关技术。

风能太阳能资源评估是指通过对某一区域的风速、风向、太阳辐射等观测要素的时间序列分析，估算区域风能、太阳能资源储量，并对资源分布情况作出分析和评价。目前，风能、太阳能资源评估方法主要有基于气象观测资料的资源评估、基于数值模拟的

资源评估、基于卫星遥感技术的资源评估等。

气象监测是基于标准自动气象站，通过网络通信实现与中心站数据传输的局地气象要素高频次监测。在风力发电和光伏发电预测中，气象监测数据既是预测模型训练和优化的主要依据，同时又是超短期预测模型的关键输入，这对气象数据采集的实时性提出了更高要求，数据传输时间间隔一般不超过 5min。

数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 是根据大气实际情况，在一定的初值和边值条件下，通过大型计算机进行数值计算，从而求解描写天气演变过程的流体力学和热力学方程组，预测未来一定时段的大气运动状态和天气现象的方法。在风力发电和光伏发电预测技术中，数值天气预报数据是短期预测模型的关键输入，提供指定空间和时间分辨率的风速、风向、总辐射、温度、气压等要素预报值。

风力发电功率预测系统和光伏发电功率预测系统是分别针对风力发电、光伏发电，利用服务器、工作站、数据通信等相关设备，进行数据信息收集、传输和高级应用的集成化人机系统。该系统一般包括数据采集单元、处理单元、存储单元、计算单元，可实现对单个或多个发电站未来一段时间内输出功率的预测，并对数据进行展示、统计、分析。

## 1.2 研究内容

本书综合国内外风力发电和光伏发电预测技术的研究进展，分析预测技术各环节中的影响因素，介绍风力发电和光伏发电预测技术中的风能和太阳能资源与发电特性研究、微区域的气象监测技术研究、数值天气预报的应用技术研究、功率预测方法研究，以及预测系统应用开发等部分。

在风能、太阳能资源与发电特性部分，主要研究了风能、太阳能的资源特性，结合风力发电和光伏发电的原理，剖析风力发电和光伏发电的出力特性，使读者能够清晰地了解大气中风的运动特征和太阳辐射的传播机理，掌握风能、太阳能时间变化与空间分布的影响因素，从而更加深入地理解研究对象。

在气象监测技术部分，从风力发电和光伏发电预测对气象实测数据的需求出发，阐述了气象要素类别、监测方式、测站选址技术和监测系统设计。新能源电站气象数据是预测模型训练、数值天气预报校验的关键数据源，同时也是风能和太阳能资源评估、新能源电站选址、电网建设规划的重要数据基础，与气象部门的专业观测形成优势互补。

数值天气预报的应用研究包括数值模式本身的研究开发、风能和太阳能模拟及预报研究。该部分介绍了 NWP 的基本原理和方法，阐述了面向风能、太阳能资源的中尺度数值模拟关键技术，并结合风力发电和光伏发电功率预测中对风速、风向、辐射等气象要素的预报需求，研究风能、太阳能数值天气预报业务系统的典型设计。在功率预测中，NWP 的优势在于通过大气运动的物理机制，准确求解大范围风能、太阳能资源分布及未来一段时间内的变化趋势，有效地克服了统计方法在气象要素短期预测中的局限性。



在风力发电和光伏发电功率预测方法研究部分,通过总结国内外技术发展现状,探讨了风和太阳辐射的主要影响因素(即预测关键量)的分类方法、量化方法,以风力发电、光伏发电的原理为基础,结合工程实践经验,阐述短期和超短期单站功率预测、区域功率预测以及多模型组合预测等建模技术,详细介绍预测误差校正和预测不确定性分析方法。

风力发电和光伏发电功率预测系统是集气象要素监测与预测、发电功率超短期和短期预测、资源特性分析评价以及数据统计分析等功能为一体的应用软件。系统以相关技术标准要求为开发依据,根据实际应用需求和应用场景进行系统设计与开发,主要研发内容包括数据库设计、系统功能设计、数据接口设计、人机界面等设计,以及相关软件开发。

### 1.3 现状与挑战

20世纪90年代初,丹麦 Risø 实验室设计开发了首个风电场短期功率预测系统 Prediktor。在随后的几十年间,一系列的政策、市场激励使得国内外风力发电和光伏发电产业得到蓬勃发展,新能源发电功率预测的需求也变得异常旺盛,预测技术从探索研究发展到现场应用,市面上出现了不同厂家研发的预测系统。

2008年11月,我国首套风电功率预测系统 WPFS 由中国电力科学研究院研发完成,并在吉林省电力调度中心投入运行。迄今为止,我国各个新能源富集省份的电网调度中心均已具备了风力发电功率或光伏发电功率预测能力。2011年,国家能源局发布《风电场功率预测预报管理暂行办法》(国能新能〔2011〕177号),要求所有已并网运行的风电场应在2012年1月1日前建立风电预测预报体系和发电计划申报工作机制,此举大力促进了预测系统在风电行业的应用推广。随着光伏发电的蓬勃兴起,光伏发电功率预测系统也获得了广泛应用。

经过多年的实践与发展,目前大多数发电功率预测系统均能达到国内相关标准的要求,但在系统运行的可靠性、预测精度的稳定性、短期预测的最大偏差等方面尚有不足,部分关键技术指标的整体水平与电网调度需求存在差距。当前风力发电和光伏发电预测还面临着一些问题和挑战。

(1) 气象监测数据的质量。风速、风向、总辐射、气压等气象监测数据是预测系统建模的主要依据,同时也是数值天气预报预测数据校准的基本前提。

在实践中发现,由于多方面的原因,气象监测系统在设备质量、日常维护以及通信保障等方面还存在较多问题,相当一部分监测系统的数据完整性、可信度堪忧,使得诸如预测模型在线训练、预测误差实时校正等重要功能难以得到广泛应用。在区域性的新能源场站群功率预测建模中,根据风能、太阳能资源特性分析的需要,需要多个甚至数十个气象监测站进行实时气象数据采集,这对不同监测站数据采集的连续性和同步性提出了较高要求。

气象监测数据直接影响着风能、太阳能资源的调查和分析研究,上述问题的解决不仅有助于预测精度的提高,也将对我国气象资源开发利用和新能源电站发展规划提供极

大帮助。

(2) 基于中尺度模式的精细化预测。目前,用于风力发电和光伏发电预测的数值天气预报主要为中尺度模式,较为常见的水平分辨率是9~1km,下部摩擦层中垂直分辨率为10m。一般而言,中尺度模式的空间分辨率并非越高越好,1km以下水平分辨率的预报精度要求,不仅超出了中尺度模式的适用范围,且不尽科学的精细化处理可能影响到气象要素预报的质量。

相比于自由大气,下部摩擦层气象要素的影响因素(如植被、建筑、地形等)更为复杂,风速、风向、太阳短波辐射的数值预报具有较高的技术难度。因此,今后中尺度区域模式将在模式的物理过程(尤其是云物理过程、湍流过程)参数化方案、资料同化方法、集合预报以及突发性、局地性的小尺度天气系统预报技巧等方面开展深入的技术研究。

对于风力发电功率预测技术,中小尺度耦合技术将有可能提供空间分辨率为100m×100m甚至更为精细的风向量预报场。在充分研究不同尺度物理多样性、风力发电机组的边界层影响,以及叶轮转动引起的尾流效应的前提下,中小尺度数值模拟将可为逐台风电机组提供更为精细的风速、风向预测值,这必将大大降低粗网格情况下由于风向量空间不均匀性所引起的水力发电功率预测误差。

用于光伏发电功率预测的数值天气预报,除考虑模式本身的研究外,还需要进一步解决大气污染排放对于大气透明度的影响问题,深入研究煤烟、沙尘等气溶胶颗粒对组件入射短波辐射的衰减效应,此外,降雪与融雪的日前预测也是一个非常值得探讨的课题。

未来数值天气预报的研究将更加侧重于行业的实际应用需求,精细化的数值预报产品将为气象资源评估、发电功率预测提供更为可靠的数据服务。随着我国数值天气预报商业化进程的推进,数据产品的成本价格逐步降低后,多源数值预报的集合预报技术的实用化将成为可能,这将大大提升气象要素预报的稳定性和准确性。

## 参 考 文 献

- [1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
- [2] 谷兴凯,范高锋,王晓蓉,等. 风电功率预测技术综述 [J]. 电网技术, 2007.
- [3] 范高锋,裴哲义,辛耀中. 风电功率预测的发展现状与展望 [J]. 中国电力, 2011, 44(6): 38-41.
- [4] C. Monteiro, R. Bessa, V. Miranda, et al. Wind power forecasting: state-of-the-art 2009 [J]. Argonne National Laboratory, ANL/DIS-10-1, Decision and Information Sciences Division, 2009, 32(2): 124-130.
- [5] E. Lorenz, J. Hurka, G. Karampela, et al. Qualified Forecast of Ensemble Power Production by Spatially Dispersed Gridconnected PV Systems [C]. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, IEA Task 36, 2007.
- [6] Lange M. On The Uncertainty of Wind Power Predictions-Analysis of The Forecast Accuracy and Statistical Distribution of Errors [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(2): 177-184.

## 第2章 风力发电和光伏发电特性

风力发电和光伏发电特性与风能和太阳能资源自身特性密切相关，它是风力发电和光伏发电功率预测技术的研究基础，也是考量预测模型适应性的重要条件。本章以气象要素观测资料、风电场和光伏电站有功功率的实际监测数据为对象，分析研究风能和太阳能资源特性及其时空分布特性，结合风力发电和光伏发电的基本原理，对风力发电、光伏发电的出力特性进行较为全面的阐述。

### 2.1 风能资源特性

风能资源是选择风电开发区域的主要依据，也是影响风力发电特性的关键因素。本节从风力发电功率预测研究的实际需求出发，对局地风能资源的变化特性以及风能资源的评价指标进行介绍。

#### 2.1.1 风的变化特性

风是由太阳辐射对地球表面加热不均所形成的气压梯度力产生的，其首要的度量指标即为风速。风速是单位时间内空气在水平方向上的移动距离，主要由气压梯度力决定。

风速可以看成时间和空间的函数，因而在不同的时间尺度下具有不同的规律。随着风速与风向的变化，风中可利用的能量也随之变化。

风速逐秒变化曲线如图 2-1 (a) 所示。风速的短时间波动主要受地形、地貌和中小尺度天气系统影响，地形、地貌对气流的影响体现为强迫作用，可以简化为刚体物质对于流体运动的影响，中小尺度天气系统的生消周期短，对大气扰动作用强，容易导致湍流。

风速逐小时变化柱状图如图 2-1 (b) 所示。风速的日变化主要与天气系统和下垫面的属性相关。一般情况下，陆地上是白天风速大，夜间风速小，这与白天太阳辐射强、空气对流旺盛密切相关。大气层高层的流体动量下传，迫使下层空气流动加速，因而近地层和地球表层一般也被看作大气动量的“汇”。日落后，热容较低的地球表层迅速冷却，大气的垂直流动趋于稳定，风速逐渐减小。相比之下，海面的粗糙度低、热容高，风速的日变化呈现与陆地相反的特点。

此外，随着季节的不同，风速也会有相应地变化，风速逐月变化柱状图如图 2-1 (c) 所示。对于东亚大陆的风能而言，受北半球永久性、半永久性天气系统等因素影响，大气的周期性调整使得地表风能普遍表现为 6—10 月贫乏，冬半年丰裕的特点。这



一季节性变化的根本原因是地球与太阳相对运动的周期性。

除时间尺度上的变化外,风速还随高度变化,风速随高度变化曲线如图 2-1 (d) 所示。风在近地层中的运动同时受到动力因素和热力因素的影响。动力因素的来源主要为地面的摩擦阻力,这一阻力可能是由地球表面自身的粗糙度引起的,也可能是由于植被及地面上的建筑物引起的,风速在高度上的变化很大程度上取决于地面的粗糙度。而热力因素则与近地层的大气垂直稳定度有直接关系,不同的层结下,风廓线的数学表达差异较大,因而风随高度的变化规律也显得复杂。

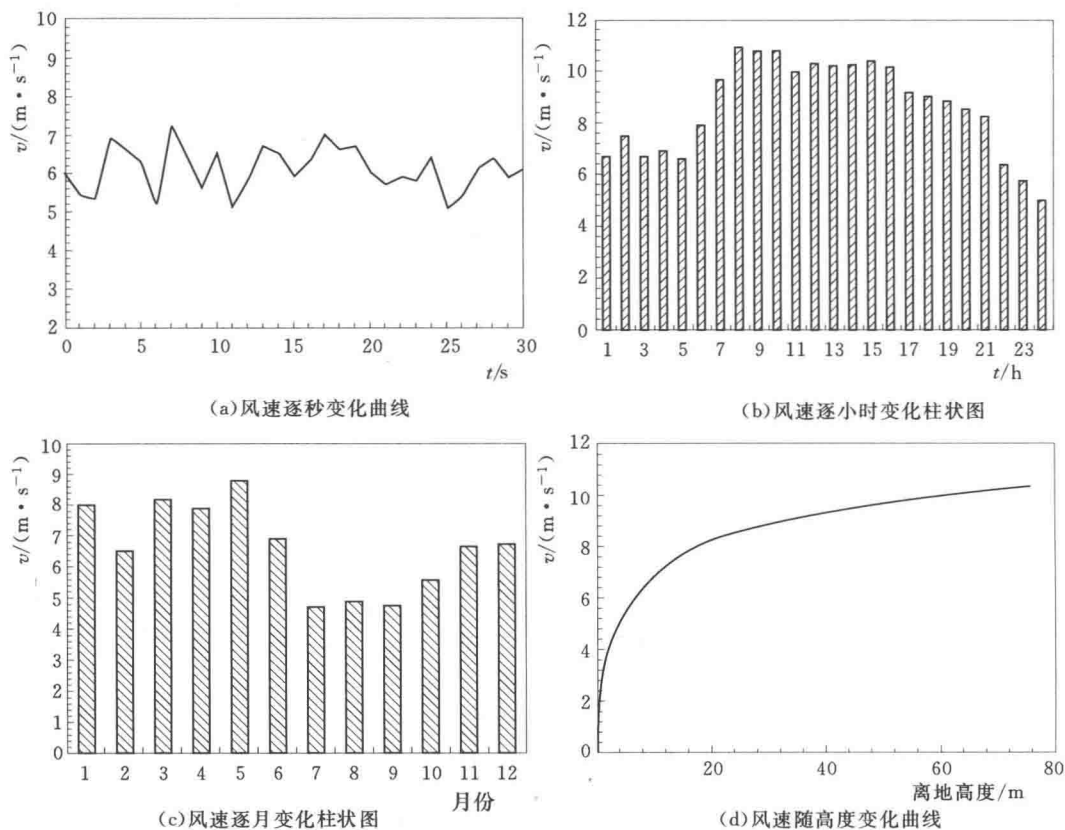


图 2-1 风速随时间、高度变化特征

## 2.1.2 风能资源的评价

针对风电场的建设与运行需求,在分析某地的风能状况时,需对采集的风数据进行分析 and 解释。离计划开发区域较近的气象站数据可以用来做初步分析,获得风况概貌。初步分析后,还要在场址上实地测风,通常为一年。

(1) 平均风速。平均风速是反映风能资源的重要参数,一般分为月平均风速和年平均风速  $\bar{v}$  :