国际电气工程先进技术译丛

风电并网：联网与系统运行（原书第2版）

Wind Power Integration: Connection and System Operational Aspects, 2nd edition

[英] 布兰登·福克斯（Brendan Fox） 等著

刘长浥 冯双磊 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于作者

贝尔法斯特女王大学的B. Fox和 D. Flynn在2000年发起建立了一个“风电大规模联网运行”的工作组，他们通过这个工作组汇聚了参加本书撰写的其他专家：北爱尔兰电力公司的L. Bryans在风电快速发展的网络规划方面经验丰富；曼彻斯特大学的N. Jenkins是风电开发的全面专家；D. Milborrow是咨询专家，从20世纪70年代起就致力于开发大规模风电；都柏林大学的M. O'Malley 和 R. Watson十多年来一直致力于电力系统和风力发电研究；苏格兰格拉斯哥Strathclyde大学的O. Anaya-Lara撰写了本书中变速风电机组的发展概论。



国际电气工程先进技术译丛

风电并网：联网与系统运行

（原书第2版）

Wind Power Integration：Connection and System Operational Aspects，2nd edition

[英]布兰登·福克斯(Brendan Fox)　等著
刘长浥　冯双磊　译

机 械 工 业 出 版 社

本书全面介绍了大规模风电并网方面的知识及相关的主要问题，帮助读者了解风电并网的最新研究成果及运行经验，介绍与风电并网相关的主要电气、机械知识，机械工程师可以学习到足够的电力工程知识，使他们可以理解风电场电压控制和故障穿越问题；而电气工程师可以从介绍的风电机组空气动力学知识中获益。他们都需要理解电力市场，尤其是风电可能如何交易。目前国内还没有像此书这样综合性地全面介绍风电场并网技术的专著。尤其在我国风电迅速发展，大规模风电并网已成为一个重大关注问题的背景下，本书有重要参考价值。

本书适用于风力发电尤其是风电并网方面的基础研究、应用等方面的有关人员，包括研究、规划、设计、建设和运行人员；本书也适用于可再生能源有关专业的大学本科生和研究生，也可用于教学培训。

Original English Language Edition published by The IET. Copyright© 2014, All Rights Reserved.
The Chinese edition Copyright© 2015 by China Machine Press.
本书中文简体字版由 IET 授权机械工业出版社独家出版。版权所有，侵权必究。
北京市版权局著作权合同登记　图字：01-2014-7997 号

图书在版编目（CIP）数据

风电并网：联网与系统运行：第 2 版/（英）福克斯（Fox，B.）等著；刘长浥，冯双磊译. —北京：机械工业出版社，2015.6
（国际电气工程先进技术译丛）
书名原文：Wind Power Integration：Connection and System Operational Aspects，2nd edition
ISBN 978-7-111-50131-2

Ⅰ.①风…　Ⅱ.①福…②刘…③冯…　Ⅲ.①风力发电—研究　Ⅳ.①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 091917 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：付承桂　责任编辑：付承桂　张沪光
版式设计：霍永明　责任校对：张玉琴
封面设计：马精明　责任印制：乔　宇
保定市中画美凯印刷有限公司印刷
2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 15.25 印张 · 337 千字
0001—2500 册
标准书号：ISBN 978-7-111-50131-2
定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务
服务咨询热线：010-88361066　　机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
　　010-88379203　　金　书　网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版　　教育服务网：www.cmpedu.com

译者的话

由于世界范围常规化石能源的枯竭和出于对环境污染日益增长的关注，世界很多国家的政府都特别重视可再生能源的发展。中国已经把发展可再生能源提高到战略高度来对待。自2006年1月1日《可再生能源法》开始实施以来，在风力发电方面，中国已成为世界上增长速度最快的国家之一。中国（不含台湾地区）的风电累积装机容量在2005年底仅为1260MW，排名世界第八；而到2010年底已经达到44.7GW，跃升为世界第一。2013年，中国的新增风电容量为16.1GW，同比增长24.1%，累积装机容量为91.4GW。2013年，全球的新增风电容量为35GW，同比增长12.5%，累积装机容量为318.1GW。[⊖]

风电资源丰富而且免费，取之不尽，又没有污染，技术也相对成熟，似乎只要风电装机容量足够多就可以解决电力乃至能源和环境问题了。其实不然，风电还有它的另一面：它的能量密度较低，获取成本相对较高；它的变化性（而且不易预测）和随机性使它难以驾驭，不能像常规发电方式那样可以根据需要加以调度，就是说，它在某种意义上还不能算是“可靠容量”，必须在相当程度上依存于常规发电能力；它对电网的支撑能力差；而且对电网的电能质量也往往有不利影响，必须采取额外的技术手段解决，这也会加大它本来就较高的成本。总而言之，随着电网风电渗透率的加大，它对以常规发电方式为基础的电力系统会构成重大挑战，会产生很多我们不熟悉的新问题。风力发电技术发展的基本方向是要使它不仅能提供电量（这是到目前为止风电在电力系统中起的主要作用），还要使它能（至少在一定程度上）如常规电厂一样对系统起支撑作用，如电压/无功功率支持、频率调节及容量备用等。只有有效解决这些问题，风电容量才能充分利用，风电才可能大规模健康发展。

本书是B. Fox、L. Bryans、D. Flynn、N. Jenkins、D. Milborrow、M. O′Malley、R. Watson和O. Anaya-Lara八位作者合作的著作。他们都是供职于爱尔兰和英国的大学和研究机构的风力发电方面的专家。贝尔法斯特女王大学的B. Fox和D. Flynn在2000年发起建立了一个“风电大规模联网运行”的工作组，他们通过这个工作组汇聚了参加本书撰写的其他专家：北爱尔兰电力公司的L. Bryans在风电快速发展的网络规划方面经验丰富；曼彻斯特大学的N. Jenkins是风电开发的全面专家；D. Milborrow是咨询专家，从20世纪70年代起就致力于开发大

⊖ 见GWEC《Global Wind 2013 Report》。

规模风电；都柏林大学的 M. O′Malley 和 R. Watson 十多年来一直致力于电力系统和风力发电研究；苏格兰格拉斯哥 Strathclyde 大学的 O. Anaya-Lara 撰写了本书中变速风电机组的发展概论。

本书全面系统介绍了大规模风电并网方面的知识及相关的主要问题，帮助读者了解风电并网的最新研究成果及运行经验，介绍与风电并网相关的主要电气、机械知识，如电气工程师可能不太熟悉的风力机空气动力学知识；机械工程师不太熟悉的电力工程学知识。目前国内像本书这样综合性地全面介绍风电场并网技术的专著还不多。在我国风电迅速发展，大规模风电并网已成为一个重大关注问题的背景下，本书有重要参考价值。本书各章节的主要内容在原书第1版的“前言”中有全面介绍，这里不再赘述。

我们在2011年与机械工业出版社合作翻译出版了本书的第1版（2007年英文版）。现在，我们很高兴与机械工业出版社再次合作翻译出版它的第2版（2014年英文版）。它与第1版的主要区别在于内容上针对七年来风电技术的新发展及其有关信息进行了全面更新，并增加了第8章“未来展望”和附录2“连接到输电系统的风电场的技术标准”。

本书适用于风力发电尤其是风电并网方面的基础研究、应用等方面的有关人员，包括研究、规划、设计、建设和运行人员；本书也可用作可再生能源有关专业的大学本科生和研究生的参考资料，也可用于教学培训。

需要指出的是，本书列举的实例大部分是以欧洲，特别是爱尔兰和英国为背景的，而我国的电力系统和风电发展状况与欧洲有很大差别。无论是电网规模还是覆盖的地理范围，中国都远大于爱尔兰；而风电资源与负荷分布的不平衡状况则远比欧洲严重；而且中国近年来风电超常规发展，相形之下相应的电网发展则严重滞后，就是说，中国风电并网问题的挑战要比欧洲及爱尔兰大得多。当然，书中论述的原理也适用于中国，只是解决这些问题的方案可能会更加复杂。

本书译校人员都是中国电力科学研究院新能源研究所的技术人员，具体分工为：刘长浥翻译第1～5章、第7章、第8章和辅文（前言和附录），并负责全书校对和统稿；冯双磊翻译第6章。限于译校者的水平，译文中难免有不准确甚至错误的地方，欢迎读者批评指正。

刘长浥

2015年3月

原书第2版前言

世界范围内的风力发电能力继续迅速发展，尤其是中国和美国，它们各自的装机容量都超过了60GW。而风力发电技术更倾向于向变速风力发电机汇聚，从2006年起的主要变化是单机容量向10MW发展。而且这些机组多半安装在海上，尤其是西北欧的沿海。英国在此领域里处于领先地位，海上装机容量超过3000MW。然而，它的成本仍然居高不下，今后10年人们很可能同心协力把海上风电成本降到接近核电。

对风力发电的反对意见几乎与该产业本身一样快速增长。反对意见集中在陆上风电场的视觉冲击，这在居民稠密区是可以理解的。也有人关注风电的成本。反对者的意见相当不公平地集中到海上风电成本，而无视它的开发先驱性质。

《风电并网》第2版使我们有机会更新风电统计数据。作者们着重论述装机容量快速增长带来的众多挑战的成本效益对策。他们也考虑了风电渗透的极限。我们希望，新版可以对工程技术人员有所帮助，并提供风电可以对可持续供电系统做出贡献的理性争论。

B. Fox
于贝尔法斯特
2013年12月

原书第1版前言

促使我们撰写本书的推动力量是风力发电的快速发展以及它对未来电力系统的规划、运行及控制的意义。它对20世纪90年代以前还是垂直组合的电力公司本来就是一个重大的挑战。在如今的自由化电力市场条件下，它的挑战性就更加强烈。本书的目的是考查风力发电大规模并网的主要问题。然后作者们根据目前最新的风电并网研究及运行经验，以他们的知识和专业经验帮助引导读者，给出解决方法。

本书的背景是英国政府（以及大部分欧洲国家政府）承诺到2010年可再生能源发电达到10%，到2020年更达到20%的雄心勃勃的目标。风力发电的成本一直在显著下降，从而带来能源成本的降低。在平均风速为8m/s及以上的地方，如在大不列颠和爱尔兰的大部分地区，风力发电成本的降低已经使风电几乎可以与联合循环燃气轮机（Combined Cycle Gas Turbine，CCGT）发电竞争，而且没有长期可用性与成本方面的问题。它的劣势在于它在电力系统运行时间尺度上的供电难以预测。无论如何，风电都不能提供“可靠容量”，因此从商业角度来说，它在市场上要受到像BETTA（British Electricity Trading and Transmission Arrangement，英国电力交易及输电规定）这样的规定的限制。但另一方面，形式为可再生能源义务证书（Renewable Obligation Certificate，ROC）的绿色激励措施也给风力发电机带来可观的额外收入。它鼓励数量越来越多的开发商进入这一领域，这表明10%的目标是可以达到的。确实，德国、西班牙和爱尔兰的风电渗透水平已经达到5%左右，而丹麦在几年前就已达到20%的水平。

本书试图为各不同专业的工程师在风电并网的所有主要方面都提供坚实的基础知识。机械工程师可以学习到足够的电力工程知识，使他们可以理解风电场电压控制和故障穿越问题；而电气工程师可以从介绍的风电机组空气动力学知识中获益。他们都需要理解电力市场，尤其是风电可能如何交易。

第1章绪论将描述20世纪90年代以来风电的重大发展，概述获取风电的各个技术选项。这一章还要说明风电大规模并网可能带来的问题，并概述了可能的解决方法。第2章主要论述电力工程的基础知识，使非电力专业的工程师能理解第2章和第4章说明的概念。第3章介绍风力发电机技术，重点介绍目前的变速风电机组设计。第4章介绍风电场联网及联网对电网设计的影响——这是一个应对变速发电机尚缺乏确定方法的领域。

第5章介绍风电功率很大程度上不可预测而且控制范围有限的情况下，电

力系统运行的关键问题。储能可以提供一个很诱人的解决方法：这里的问题主要是如何确定切实可行、低成本的选项并假定使用现有的抽水蓄能电站。第6章的主要内容是强调了风电功率预测的重要性，介绍了近10年来在这一领域令人鼓舞的进展。组合预测法是一种有用的运行工具，至少可以为系统运营商提供预测可靠性的指标。最后，第7章归纳了电力市场的主要类型，讨论了风电交易的前景，解释并讨论了支持可再生能源的主要方案。㊀

本书的大部分内容来自作为工程及物理研究会（Engineering and Physical Sciences Research Council，EPSRC）的一部分，“风电大规模入网情况下的系统运行”网络组织的多个工作组。这个网络后来被简称为BLOWING（Bringing Large-Scale Operation of Wind Power into Networks and Grids，风电大规模入网情况下的系统运行）网络。本书反映了很多涉及作者和网络成员的活跃讨论。这些成员里我们要特别提到Graeme Bethurst，Richard Brownsword，Edward Clarke，Ruairi Costello，Lewis Dale，Michael Farrell，Colin Foote，Paul Gardner，Sean Giblin，Nick Goodall，Jim Halliday，Brian Hurley，Michael Jackson，Daniel Kirschen，Lars Landberg，Derek Lumb，Andy McCrea，Philip O’Donnell，Thales Papazoglou，Andrew Power和Jennie Weatherill。Janaka Ekanayake，Gnanasamnbandapillai Ramtharan和Nolan Caliao帮助撰写了第3章。我们还要提到Shashi Persaud博士。20世纪90年代后期他在女王大学攻读博士学位期间的研究对提出网络建议起了很大作用，而且他后来又一直帮助进行了网络管理。

B. Fox
于贝尔法斯特
2006年11月

㊀ 本书第2版新增了第8章“未来展望”。其内容不言自明。——译者注

目　录

译者的话

原书第 2 版前言

原书第 1 版前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　概论 …… 1

1.2　世界能源状况和气候变化 …… 1

1.2.1　可再生能源 …… 2

1.3　风力发电 …… 4

1.3.1　背景 …… 4

1.3.2　风电机组容量和出力的变化 …… 5

1.3.3　发电量 …… 6

1.4　设计选项 …… 7

1.4.1　叶片 …… 7

1.4.2　控制和传动系统 …… 7

1.4.3　主要设计选项小结 …… 8

1.5　风电场 …… 8

1.5.1　海上风电场 …… 9

1.6　经济性 …… 10

1.6.1　风电机组价格 …… 10

1.6.2　发电成本 …… 10

1.6.3　二氧化碳减排 …… 12

1.7　并网和变化性——关键问题 …… 12

1.7.1　风电的波动性 …… 13

1.7.2　容量可信度 …… 14

1.7.3　嵌入式发电的效益和影响 …… 14

1.7.4　储能 …… 15

1.8　将来的发展 …… 15

1.8.1　技术方面 …… 15

1.8.2　未来价格趋势 …… 16

1.8.3　市场发展 …… 16

1.8.4　并网问题 …… 16

第 2 章　电力系统基础知识 …… 17

2.1　引言 …… 17

2.2　基本原理 …… 17

2.2.1　电磁学 …… 17

2.2.2　磁路 …… 19

2.2.3　电磁感应 …… 19

2.2.4　供电 …… 20

2.2.5　变压器 …… 21

2.3　交流供电 …… 23

2.3.1　稳态交流系统功率 …… 23

2.3.2　相量 …… 24

2.3.3　交流系统的功率 …… 26

2.4　电力系统简介 …… 27

2.4.1　三相系统 …… 27

2.4.2　单相系统与三相系统的比较 …… 28

2.4.3　三相供电 …… 29

2.4.4　平衡星形联结负荷 …… 30

2.4.5　平衡三角形联结负荷 …… 30

2.4.6　一些有用的惯例 …… 31

2.4.7　复功率 …… 31

2.4.8　等效单相法 …… 32

2.4.9　标幺值系统 …… 33

2.5　输电 …… 35

2.5.1　线路参数 …… 35

2.5.2　线路模型 …… 37

2.5.3　输电 …… 38

2.5.4　电压调节 …… 39

第 3 章　风力发电技术 …… 41

3.1　引言 …… 41

3.2　风电技术的历史回顾 …… 41

3.3　大型风力发电机的设计选择 …… 42

3.4　获取能量和功率控制…… 43
3.4.1　风轮扫掠面积上获取的能量…… 43
3.4.2　功率控制…… 47
3.5　定速风电机组…… 49
3.5.1　感应（异步）发电机概述 … 50
3.5.2　基于感应发电机的定速风电机组…… 55
3.6　变速风电机组…… 57
3.6.1　双馈感应发电机（DFIG）风电机组…… 57
3.6.2　大范围变速同步发电机风电机组…… 61
说明：贝茨极限（Betz Limit） …… 67
第 4 章　风电并网 …… 70
4.1　引言…… 70
4.2　风电场起动…… 70
4.3　电网电压管理…… 71
4.3.1　电压等级问题…… 72
4.4　热效应/有功功率控制 …… 84
4.4.1　规划方法/标准 …… 84
4.4.2　风电场联网问题…… 84
4.4.3　主干系统问题…… 86
4.4.4　设备问题…… 88
4.5　电网电能质量管理…… 91
4.5.1　电压降落…… 91
4.5.2　谐波…… 91
4.5.3　闪变…… 92
4.6　系统暂态性能…… 92
4.6.1　频率性能和动态响应…… 92
4.6.2　暂态响应…… 96
4.7　故障水平问题…… 99
4.7.1　设备通流能力 …… 100
4.8　信息 …… 101
4.9　保护 …… 101
4.9.1　系统保护 …… 101
4.9.2　与输电系统相连的风电场 … 102
4.9.3　与配电系统相连的风电场 … 104
4.9.4　风电场保护 …… 105
第 5 章　电力系统运行 …… 107
5.1　引言 …… 107
5.2　负荷-频率控制 …… 107
5.2.1　发电机组的负荷-频率控制 …… …… 111
5.2.2　频率紧急控制 …… 113
5.3　含风电系统的运行 …… 117
5.3.1　风电的系统运行挑战概述 … 117
5.3.2　爱尔兰的风力发电 …… 119
5.3.3　系统运行和风的变化性 …… 132
5.3.4　系统运行模式 …… 140
5.3.5　容量可信度 …… 145
5.3.6　提供辅助服务 …… 148
5.3.7　风力发电机惯性响应 …… 154
5.3.8　分布式发电的保护 …… 157
5.4　电量平衡 …… 159
5.5　储能与负荷侧参与 …… 161
5.5.1　常规储能 …… 163
5.5.2　需求侧参与 …… 165
5.5.3　氢气储能 …… 167
第 6 章　风电功率预测 …… 169
6.1　引言 …… 169
6.2　气象背景 …… 169
6.2.1　气象、天气与气候 …… 169
6.2.2　大气结构与尺度 …… 170
6.3　数值天气预报 …… 171
6.4　持续预测 …… 173
6.4.1　误差指标 …… 173
6.4.2　基准模型 …… 176
6.5　高级风电功率预测系统 …… 179
6.5.1　Prediktor …… 182
6.5.2　统计模型 …… 186
6.5.3　集合预报 …… 190
6.6　结论 …… 191
第 7 章　风电和电力市场 …… 192
7.1　引言 …… 192
7.2　电力市场 …… 193
7.3　平衡、容量及辅助服务 …… 195
7.4　支持机制 …… 196

7.5 成本 …… 197
7.6 效益 …… 199
7.7 投资和风险 …… 200
7.8 市场发展 …… 201
第8章 未来展望 …… 203
8.1 引言 …… 203
8.2 并网法规及其他问题 …… 204
8.3 与其他低碳发电形式共存 …… 204
8.4 需求侧参与 …… 205
8.5 电源多样化 …… 206
附录A FACTS技术 …… 207
附录B 连接到输电系统的风电场的技术标准 …… 212
参考文献 …… 222

第1章 绪 论

1.1 概论

可再生能源发展的主要动力来自人们对全球变暖、化石燃料的价格及安全的日益增长的关注。人们采用了很多政策工具来鼓励发展低碳技术。毫不奇怪，早期（1980年以后）发展最迅速的地方就是补贴最慷慨的地方，如（美国）加利福尼亚、丹麦、德国和西班牙。近期以来，风力发电在美国全境、中国、印度、葡萄牙和爱尔兰都得到迅猛发展。2012年，丹麦消费电力的28%是风力发电，在爱尔兰、西班牙和葡萄牙，这个数字是16%～18%，德国超过10%，英国、罗马尼亚和希腊超过6%（Wiser and Bolinger，2013）。

风力发电在过去10多年里保持了25%的复合增长率，在2013年中，它的总装机容量已经达到280GW（Milborrow，2013）。这一数量的风能的年发电能力约为540TWh—略低于法国的年消费电量。随着技术的发展，风力发电的可靠性提高了，发电成本降低了，从而取得了与其他热力能源和可再生能源并列的地位。

“如果不刮风会怎么样?”这样的问题是对风力发电的一个直觉反应，但这个问题过于简单化。对整个电力系统而言，运营商关注的问题是风电增加的不确定性。一些研究现在已经对间歇性的成本做了定量，这一成本是适度的，而且这些研究也明确表明，风电可以替代常规的火电容量。严格来说，风力是变化的，而非间歇的，而火电厂因为可能和确实会瞬时“跳闸”离线，所以它才是间歇的。

集中式发电的大型风电机组的直径已经超过100m，单机容量已经达到6MW，而且更大的风电机组还在开发之中。但离网应用的风电机组却小得多，而且它们成功的商业使用标准也不相同，因为由于它们有时需要使用输入燃料，所以发电成本经常很高。

在2013年中期，海上风电已经有将近5000MW容量在运行，而且预计还会持续增长，原因之一是它可以降低环境影响。在丹麦、德国及英国等国，人们一直积极开发海上风电，而且很可能对一直强劲增长的风电装机容量做出重要贡献。到2013年底，海上风电装机很可能超过300GW。

1.2 世界能源状况和气候变化

全世界的一次能源需求从1971年到2010年翻了一番多，而且预期到2020年还要再增长40%。过去30年里，能源明显从石油向天然气转移。在2010年，全世界范围内，天然气已经占一次能源消费的21%，占发电用一次能源的22%（国际能源署，In-

ternational Energy Agency，IEA，2013）。

用于取暖和发电时，天然气产生的二氧化碳排放少于煤炭和石油，因此过去40年里，二氧化碳排放的增加与能源需求的增长之间并不相当，并没有翻番。然而，由于对全球变暖问题日益增长的关注，世界各国政府开始讨论降低二氧化碳排放增长的方法。在联合国的支持下，国际气候变化谈判一直在进行，而且1997年12月在京都的一次关键会议上，各方达成了从1990年到2008～2012年的目标日期窗口全球温室气体排放降低5%的总体目标，并设定了各自的国家的目标。2004年2月16日，京都议定书最终成为有法律约束力的文件。2012年12月，该议定书又进一步延伸，包括了到2020年这一期间的排放目标，但美国和中国没有包括在内，仅包括了世界碳排放的15%。

1.2.1　可再生能源

2010年，可再生能源在全世界的一次能源中占的比重为12.2%（水电2.3%，可燃可再生能源及废弃物占10%，地热、太阳能和风能占0.9%）[⊖]。因为有相当多的可燃可再生能源用于供热，所以它们在发电方面的贡献与以上数字有一定差别：水电贡献为16%，地热、太阳能、风能和可燃可再生能源的贡献为3.7%。尽管水电装机有相当数量处于发展中国家，但发达国家的多数可再生能源工作集中于风电、太阳能和生物质能技术。2010年，全世界的水力发电量为3428TWh，而其他全部可再生能源的发电量为792TWh（国际能源署，2012）。

并不存在限制继续开发水力发电的技术和经济原因，但大规模开发水电需要大量土地来建设水库，而这种地点经常很难找到。因此，大规模开发水电通常不能进入大部分可再生能源支持机制的保护伞之下。而小规模开发，包括径流式方案通常会得到支持，但这样的发电成本通常较高。拦潮闸技术的进一步开发也可能因同样的理由受到限制，尽管这一技术已为人们充分了解并得到证实。另一方面，潮汐流技术还是一项较新的技术，它要使用水下涡轮机，利用潮汐流能量，在概念上与风力涡轮相似。它是欧盟进行的研究活动的重点，它的原型机目前正在试验。波浪能也处于类似的开发阶段，它的研究工作正在经济合作及发展组织（Organisation for Economic Co-operation and Development，OECD）内进行，很多原型装置目前都在试验中。

1.2.1.1　支持机制

尽管某些可再生能源能够或已经可以与化石能源进行商业竞争，但它们的新兴状态通常都要通过各种支持才能得到普遍承认。在过去10年左右，出现了各种支持体系：

（1）资本金补贴：这类机制至少部分支持了20世纪80年代早期加利福尼亚风电的飞速发展。（慷慨的发电量补贴也是一项助长因素。）资本金补贴在欧洲也出现过，但现在已经很少见。

（2）某些欧洲国家通过标准发电电价支付体系支持可再生能源，通常是消费电价的某个百分数。在这些机制中，德国和丹麦的机制对市场的刺激非常有效。德国的风电

⊖ 原文如此。但这几个数字有矛盾。如果后面3个数字是正确的，则第一个数字应为13.2%。——译者注

支持机制现在已经非常复杂，甚至细致到具体场址的风速。

（3）竞争性投标：可以以英国的非化石燃料义务法（Non-fossil Fuel Obligation，NFFO）为例。开发商以他们可以承受的电价竞标。投标电价需要低于政府设定的对于相应装机容量的限值，中标者这时可以获得长期合同。这种机制在英国经历了很多变化并为法国和爱尔兰所仿效，但近期可能会被新机制取代。

（4）电价部分补贴：美国的发电税收抵免是这种方法的一个范例；成功的可再生能源项目可以享受每单位发电量 0.021 美元的补贴。

（5）义务：美国的可再生能源配额制（Renewables Portfolio Standard）和英国的可再生能源义务法（Renewables Obligation，RO）是这种方法的典型。它实质上是要求到规定日期，电力供应商使用可再生能源发出的电量必须达到规定的百分数。不能满足这一要求的供应商受到的惩罚是所谓收购支付（buy-out payment）。

标准支付通常在鼓励发展方面比较成功，尽管它对降低电价的激励不够有力（目前德国的激励体系试图用逐年减少支付的方法克服这一缺点）。竞争性方案，如 NFFO，在鼓励发展方面有时不够成功，但英国的 NFFO 在降低电价上却非常成功。

1.2.1.2　欧盟和英国的可再生能源：装机容量和目标

2010 年实施的欧盟关于可再生能源的 2009/28/EC 指令设置了所有成员国的雄心勃勃的目标：在 2020 年，欧盟的可再生能源发电份额将达到 20%；在运输部门，可再生能源的份额将达到 10%。

英国的目标是到 2020 可再生能源发电量达到 15%，可再生能源国家行动计划（更新的英国政府网站）给出了使英国达到 2020 年目标的各种措施的细节。英国政府认为，通过国内行动，目标是可行的；每个部门的能源消费中，可再生能源达到如下比例就可以实现目标：

1）电力需求的 30%，包括 2% 来自小规模能源；

2）供热需求的 12%；

3）运输需求的 10%。

1.2.1.3　政策手段

从 2002 年起，英国用力激励可再生能源发电发展的主要手段是 RO。近期，它还通过上网电价（Feed-In Tariff，FIT）体制支持小规模发电。

RO 于 2002 年在英格兰、威尔士和苏格兰生效，于 2005 年在北爱尔兰生效。它给英国电力供应商提出的义务是，他们需要不断提高向用户提供的可再生能源发电份额。可再生能源义务证书（Renewable Obligation Certificates，ROC）是当局向得到认可的可再生能源发电站运营商颁发的，证明他们发出的电力符合可再生能源标准的绿色证书。然后，运营商可以与其他当事方进行交易，使 ROC 最终为电力供应商使用，证明他们履行了应承担的义务。

如果电力供应商没有足够数量的履行义务的 ROC，则他们必须支付等量的收购基金（‘buy-out’fund）。该体制的管理成本由该基金支付，基金的剩余部分再按电力供应商相对于他们各自的义务生产的 ROC 数量比例重新分配给他们。

在2011～2012年度，共发行了3480万份ROC，得到认可的可再生能源发电站发出的总电力为31.0TWh，与2010～2011年度相比，增加了34%。2011～2012年度英国总的供电量为308TWh，总的额外支出为14.5亿英镑（OFGEM，2013）。

RO将会被差价合同（Contracts for Differences，CfD）取代。后者的手段是提供可预测收益流，目的是激励低碳技术［包括可再生能源、核电、碳捕获及封存（Carbon Capture and Storage，CCS）］的投资。通过降低投资者的风险且确保融资更加便捷、成本更低，CfD可以鼓励投资。CfD是长期合同。它向发电商支付电力市场价的估计数（参考价格）与带动向给定技术投资所需的长期价格估计数（'strike price'，履约价格）之间的差价。这可以降低发电商面临的长期电价易变性，以消费者的最低代价，从根本上降低商业风险，鼓励低碳发电的投资。

履约价格草案中，陆上风电为100英镑/MWh，海上风电为155英镑/MWh。这些价格将在2014/2015年度（此时第一批合同将落实）到2018/2019年度实施［能源及气候变化部（Department of Energy and Climate Change），2013］。

1.3　风力发电

1.3.1　背景

从1990年到2005年，全世界风电装机容量每三年翻一番。人们怀疑其他能源技术现在和过去是否能以这种可观的速度发展。从世纪之交以来，它的发展步伐略有下降，但2000年到2012年之间，装机容量仍然每3.5年翻一番；这一时期的年复合增长率为25%。装机容量在这一时期的增长历程如图1-1所示。

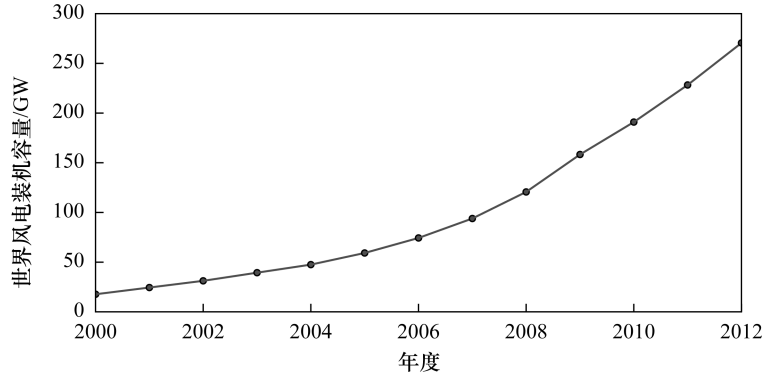


图1-1　世界风电装机容量的发展（2000～2012年）

到2012年底，美国处于世界风电装机的领先地位，为62.2GW；其次为中国，装机容量60.8GW；德国31.3GW；西班牙22.8GW。2012年底，全世界风电装机容量为

270GW。2012 年丹麦西部的风电发电量占消费电量的 25%。有时，它的风电发电量相当于日德兰㊀(Jutland) 的总消费电量。

到 2012 年底，海上风电的总装机容量为 4969MW，其中英国的装机容量最大，为 2679MW。其次是丹麦，装机容量为 922MW；比利时为 380MW；荷兰为 247MW。更多海上风电场正在规划中。如果作为欧盟成员的国家可再生能源规划一部分的 2020 年装机容量目标全部实现的话，届时欧盟的海上风电装机容量将超过 41GW。与陆上风电相比，海上风电要昂贵得多，但它可以部分被较高风速带来的较高电力生产率所补偿。此外，这种资源极其丰富且环境影响较小。

很多海上风电场建在靠近海岸的浅水区。它的基础设计多种多样，但‘单柱’结构可能是最常见的。然而，水深一旦超过约 30m，则浮动式风力机的前景变得越来越有吸引力。人们已经建成了几个实验性装置，对几种可能设计的可行性及成本的大量研究也正在进行。

推动这种快速发展的不仅有各种财政支持机制，还因为风电技术极其快速地成熟。发电量的提高一方面是由于可靠性得到了改善，另一方面也得益于大型风电机组的开发。规模化发展的经济性对效率的提高只能起适度的作用，而风电机组加大意味着塔架更高，风轮能捕捉到更高风速。技术发展也伴随着成本降低，而成本降低部分是由于规模化的经济性，部分是由于生产技术的改进。最后，风电的成功也因为人们越来越意识到风力资源，尤其是海上风力资源的重大价值，而且它的能源成本正在接近使用常规燃料发电成本。在某些地点，风力发电的成本甚至低于常规燃料发电成本。

1.3.2　风电机组容量和出力的变化

20 世纪 80 年代左右的早期风电机组还相当小（50 ~ 100kW，直径 15 ~ 20m），但商用风电机组的单机容量一直在稳定增长。图 1-2 跟踪了德国从 2000 年到 2012 年安装的风电机组的平均容量。在此期间，单机平均额定出力翻了一番，从 1114kW 增大到 2419kW。

随着风电机组单机容量的增长，轮毂高度也在增加。按照经验方法，轮毂高度通常与风轮直径相似，但很多制造商提供高塔架选项，以达到更高出力。有些风电机组的直径约 70m，但轮毂高度却达到 100m。增加发电量的另一个方法是加大发电机额定功率。然而，额定功率越大，达到最大出力的时间越少。因此安装额定功率很大的发电机经济上并不合理，因为达到最大出力的高风速每年只能遇到几个小时。因为风电机组制造商也要受到类似的经济压力，因此大部分制造商把额定出力定为与 400W/m^2 风轮扫掠面积相对应。因此 20 世纪 90 年代早期上市的 40m 直径风机的出力约为 500kW。比如平均风速 7.5m/s，且具有典型风速分布模式，则意味着达到最大出力的时间约为全年的

㊀ 日德兰半岛是欧洲北部的半岛，位于北海和波罗的海之间，构成丹麦国土的大部分，西和北分别为北海和斯卡格拉克海峡，东为卡特加特海峡和小贝尔特海峡。人口约 235 万。广义上说，它还包括德国石勒苏益格-荷尔斯泰因州。——译者注