



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

Wind Turbine Drivetrains—Design and Analysis



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

风电传动系统的设计与分析

诺迈士 编著

上海科学技术出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



风电传动系统的设计与分析

Wind Turbine Drivetrains — Design and Analysis

诺迈士 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

风电传动系统的设计与分析/诺迈士编著. —上海:
上海科学技术出版社, 2013. 1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1540-3

I. ①风… II. ①诺… III. ①风力发电机—发电机组
—电力传动系统—系统设计 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281567 号

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海市钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.25 插页 4

字数:245 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1540-3/TM·37

定价:46.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书系统介绍如何设计高可靠性和经济性的风力发电机传动系统。第1章为概述；第2章主要介绍风力发电机传动系统的分类与特征；第3章着重介绍风力发电机传动系统设计，从项目计划到方案设计、详细设计和分析等；第4章介绍现场测试；第5章介绍状态监测和故障诊断，包括状态、监控技术、诊断技术和维护实践经验等；第6章主要介绍风力发电机传动系统技术发展动态。

本书可供从事风电机组传动系统设计、测试、维护和管理等方面工作的专业技术人员使用，也可作为高等院校相关专业的本科生和研究生的参考教材。

《新能源出版工程》

学术顾问(以姓氏笔画为序)

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

编委会

主 任

倪维斗

委 员(以姓氏笔画为序)

毛宗强 朱 军 贡 俊 李 春

张家倍 张德祥 周凤翔 徐洪杰

殷承良 閻耀保 喜文华 董长青

董亲翔 鲍 杰 戴松元

前 言

风电是资源潜力大、技术较为成熟的可再生能源,在解决传统化石燃料对环境影响的问题上发挥了积极的作用。近年来,我国风电产业持续快速发展,“十一五”期间风电装机容量连续五年翻番,成为全球风电装机容量最大的国家。在《风电发展“十二五”规划》中,制定了风电发展的总目标,到2015年,投入运行的风电装机容量达到1亿kW,年发电量达到1900亿kW·h,风电发电量在全部发电量中的比重超过3%。在此期间,实现风电机组整机设计和核心部件制造技术的突破,海上风电设备制造能力明显增强,基本形成完整的具有国际竞争力的风电设备制造产业体系。

传动系统是整个风力发电机中必需的、造价又较高的组件,其可靠性一直是风电行业的一个主要问题。风电机组一般安装在高山、荒郊及海上,传动系统又安装在机组塔筒之上的有限空间内,使得维修更加困难,维修费用高昂。在此背景下,作者编写了本书,供致力于风机传动系统开发、研究和测试维护的读者参考,并希望能够为风电设备产业发展贡献绵薄之力。

本书主要介绍如何设计高可靠性和经济性的风力发电机传动系统。全书共分为6章。第1章为概述,介绍了传动系统的重要性;第2章主要介绍风力发电机传动系统的分类与特征;第3章着重介绍风力发电机传动系统设计,从项目计划到方案设计、详细设计和分析等;第4章介绍现场测试;第5章介绍状态监测和故障诊断,包括状态监控技术、诊断技术和维护实践经验等;第6章主要介绍风力发电机传动系统技术发展趋势。

本书可供从事风电机组传动系统设计、测试、维护和管理等方面工作的专业技术人员使用,也可作为高等院校相关专业的本科生和研究生的参考教材。

虽然编者对本书的编写作了非常大地努力,但由于时间紧张,编者的能力和水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概述 / 1

- 1.1 风能应用及其优势 / 1
- 1.2 风能市场现状与发展 / 3
 - 1.2.1 市场现状 / 3
 - 1.2.2 市场前景 / 6
- 1.3 风资源特性 / 7
 - 1.3.1 风的自然属性 / 7
 - 1.3.2 地形对风的影响 / 8
 - 1.3.3 时间对风的影响 / 9
 - 1.3.4 湍流 / 9
- 1.4 风力发电机发展史 / 10
- 1.5 风力发电机结构 / 15
 - 1.5.1 叶轮 / 16
 - 1.5.2 传动系统 / 18
 - 1.5.3 电气系统 / 19
- 1.6 传动系统的重要性及本书主旨 / 20
 - 1.6.1 风力发电机齿轮箱的特点 / 21
 - 1.6.2 传动系统对整机的影响 / 25
 - 1.6.3 本书主旨 / 27

第 2 章 风力发电机传动系统的分类与特征 / 28

- 2.1 按驱动方式分类 / 28
 - 2.1.1 直驱型 / 29
 - 2.1.2 半直驱型 / 29
 - 2.1.3 高速型 / 29
- 2.2 按支撑方式分类 / 31
 - 2.2.1 两点支撑 / 32
 - 2.2.2 三点支撑 / 32

2.2.3 法兰安装式 / 33

第3章 风力发电机传动系统设计 / 35

3.1 设计目标 / 37

3.2 项目计划 / 38

3.2.1 产品设计规范(PDS) / 38

3.2.2 设计信息 / 38

3.2.3 设计标准 / 39

3.2.4 分析方法 / 40

3.3 方案设计 / 42

3.3.1 方案结构 / 42

3.3.2 传动比分配 / 43

3.3.3 齿轮设计 / 44

3.3.4 轴尺寸的确定 / 65

3.3.5 轴承选型 / 66

3.3.6 箱体和总体结构 / 71

3.3.7 齿轮错位量分析 / 72

3.3.8 方案选型 / 73

3.4 详细设计与分析 / 74

3.4.1 箱体及行星架设计 / 75

3.4.2 结构变形分析 / 77

3.4.3 轴的设计 / 77

3.4.4 齿轮微观几何 / 81

3.4.5 齿轮耐久性分析及优化 / 87

3.4.6 轴承分析 / 87

3.4.7 装配设计 / 93

3.4.8 动力学 / 93

3.4.9 润滑系统 / 94

3.4.10 密封 / 99

3.4.11 胶合 / 99

3.5 公差与图纸 / 101

3.5.1 尺寸链分析 / 102

3.5.2 二次计算与优化 / 110

3.5.3 2D 图纸生成 / 110

3.6 认证机构 / 110

第4章 现场测试 / 113

- 4.1 测试目的和测试部件 / 113
- 4.2 风力发电机齿轮箱样机测试流程 / 114
- 4.3 其他测试方法 / 116
 - 4.3.1 下线测试 / 116
 - 4.3.2 加速寿命测试 / 117
- 4.4 试验台类型 / 119
 - 4.4.1 开环试验台 / 119
 - 4.4.2 电闭环试验台 / 120
 - 4.4.3 机械闭环试验台 / 120
- 4.5 风力发电机齿轮箱生命周期的测试与监控 / 121

第5章 状态监控和故障诊断 / 123

- 5.1 早期诊断的重要性 / 123
- 5.2 状态监控系统 / 123
 - 5.2.1 振动 / 124
 - 5.2.2 扭矩 / 130
 - 5.2.3 油液分析 / 130
 - 5.2.4 颗粒计数器 / 131
 - 5.2.5 油温 / 131
 - 5.2.6 声发射技术 / 131
 - 5.2.7 软件 / 132
- 5.3 故障诊断技术 / 132
 - 5.3.1 整机 SCADA 诊断 / 132
 - 5.3.2 振动诊断 / 134
- 5.4 维护 / 141
 - 5.4.1 故障率函数 / 141
 - 5.4.2 被动维护 / 142
 - 5.4.3 预防性维护 / 142
 - 5.4.4 前瞻性维护 / 143
 - 5.4.5 以可靠性为中心的维护 / 143
 - 5.4.6 维护的反馈 / 144

第6章 风力发电机传动系统技术发展动态 / 145

- 6.1 半直驱传动系统的方案 / 145
- 6.2 行星齿轮的液体动压轴承 / 146

6.3 永磁发电机 / 147

6.4 超导发电机 / 147

6.5 无极变速器 / 148

参考文献 / 149

第 1 章

概 述

1.1 风能应用及其优势

据史料记载,人类对风能的应用已有几千年的历史,甚至可能比记载的时间更为久远。大约在 7 000 年前,尼罗河流域就有风能驱动的船只在航行。直到公元前 200 年,才在中国出现了用于汲水的简易风车;与此同时,在波斯和中东也出现了第一批用于碾磨谷物的垂直轴风车,这些风车装有由芦苇编织而成的帆。

后来风能应用技术迅速传播开来并最终遍及全球。到 11 世纪,风车已经在中东地区被广泛应用于生产食物;而在此经商的商人与远征至此的十字军则将这项技术带回了欧洲。此后,人们对风车加以改进使其可以用于湖泊汲水。在美国,人们把风车技术带入了 19 世纪末的新时代,风车不但应用于农场和牧场的汲水,后来还用来为家庭和工业供电。图 1-1 为农场上的一台风车正在给水塔注水。

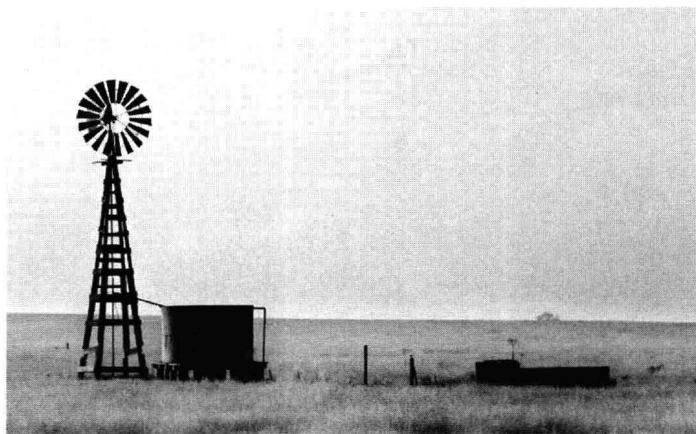


图 1-1 农用汲水风车

随后由欧洲传播到美国的工业化进程使得风车的应用又逐年减少。汲水风车被蒸汽机所取代。然而,工业化进程也开启了人类使用大型风车发电并用于远程供电的新纪元。

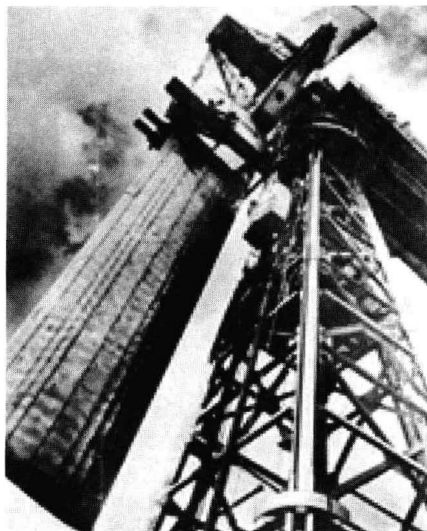


图 1-2 世界上第一台大型发电风车

通常情况下,这些大型风车被认为是现代风力发电机的鼻祖。第一台用于发电的大型风车(当时的世界之最)于 1941 年在福蒙特山巅上组建并投入试车,如图 1-2 所示,这台风力发电机受益于当时新英格兰有力的风能政策^[1]。

整个 20 世纪,用于农场和居民供电的小型风能发电厂与实现并网远程输电的大型发电机同步发展。风力发电机的尺寸范围极广,下至用于居民电池充电的小型电厂,上至用于向国家电网供电的大型海上风场的兆瓦级风力发电机。

通常情况下,风能的使用会受到化石燃料价格的影响。但随着全世界越来越多的人开始关注环境问题,化石燃料已经处在历史的十字路口。几年前,一些联合国科学家和逾 160 个政府承认燃烧化石燃料(煤、石油和天然气)会引起气候的剧烈变化。据英国政府预测,全球气候变暖将导致几百万人的生命处于饥饿、干旱、洪水或疾病(如疟疾)的威胁之中,并引发物种灭绝。科学研究表明,由于全球气候变暖,全球平均气温将在 2100 年较现在升高 $2.5 \sim 10.4^{\circ}\text{F}$ ^①。全球气候变暖最直接的威胁是极地冰原覆盖率的锐减,这直接威胁到极地物种的生存,如图 1-3 所示。仅在过去的几年中,由全球气候变暖直接或间接引发的海平面上升、热浪、干旱和大风暴(如卡特琳娜飓风)摧毁了成千上万的生命。据国际卫生组织估计,全球已有超过 20 万人死于全球气候变暖。

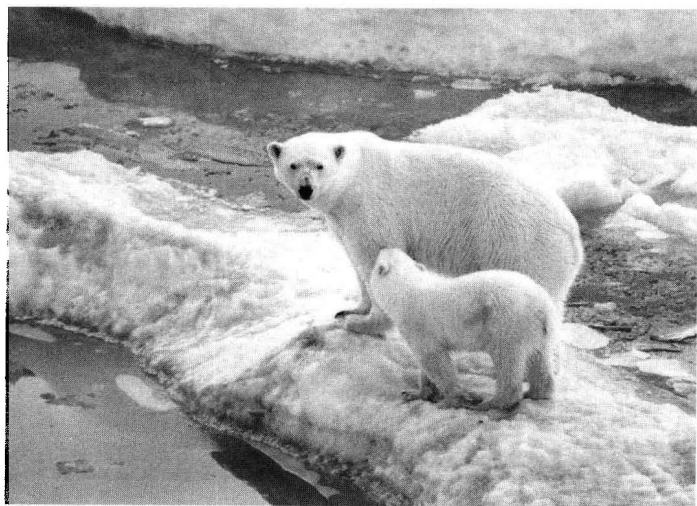


图 1-3 冰原覆盖率锐减

① $1^{\circ}\text{F}=0.5556^{\circ}\text{C}$ 。

自18世纪工业革命后的几个世纪里,化石燃料一直是最重要的能源资源。石油,这种被喻为“工业的血液”,且作为支撑社会和经济发展的不可或缺的矿产资源,已经再也无法满足全世界的需求。全世界的石油需求增长迅速,供不应求的局面已经摆在我们面前。理论上石油资源将在21世纪枯竭。现在几乎全世界都在积极探索清洁能源,据悉目前已有上千亿美元投入到可再生能源工业中^[2]。

当全球气候变化已经成为事实,矿产资源面临枯竭的时候,各国政府、大型能源公司和投资者都开始积极促进风能的发展,以避免因全球气候变暖引发的巨大损失和经济风险,如今风能已经从一个非传统能源发展成为一个每年都有上千兆瓦装机容量的新兴能源分支。随着风力发电场在全球的快速传播,运营经验的积累以及持续的风能开发研究,都将帮助风能发电的成本实现大幅削减,甚至已经在某些地区逼近传统度电成本^[3]。在接下来的几个世纪里,风能发电容量将持续稳步增长。

光能、风能、水能都是可以替代煤炭、石油和天然气等化石燃料的可再生能源。然而,在很多国家水利发电已经接近饱和,太阳能集热器和光伏电板技术也遇到了环境污染的问题,太阳能产业已经受政策束缚多年,前景也并不乐观。但同为可再生能源的风能依靠其自身的优点实现了平稳有序的发展,其优点具体如下:

① 风能,顾名思义是由风提供能量,因此它首先是一种清洁能源。它不会像火电厂一样污染空气,风力发电机也不会向大气排放有害气体,所以不会有引起酸雨和温室效应的顾虑。

② 风能作为一种可再生能源,是取之不尽、用之不竭的。风能本质上是太阳能的一种转化形式,它是太阳向大气层辐射热量、地球自转和地表地形不规则等几个因素共同作用的结果。

③ 风能是当今最廉价的可再生能源,平均每度电成本在4~6美分,具体数值因项目风能资源和项目融资情况不同而有所差异。

④ 风力发电机可以建造在农场和牧场上,这些地方往往是最佳的风址,这对带动乡村经济有积极的作用。由于风力发电机只占用一小块地,所以农民和牧民可以继续在地里工作,而电厂也会因租用土地向农民或牧民支付一定数额的租金。

那么风力发电机到底是如何发电的呢?简单地说,风力发电机的工作原理正好跟风扇相反,它利用风能来发电。风能带动风力发电机叶片,叶片带动转轴,最后由轴带动发电机切割磁力线实现发电,如图1-4所示^[4]。

1.2 风能市场现状与发展

1.2.1 市场现状

据估计,全球风能所蕴藏的动能仅仅是由地球吸收的太阳能中的1%转化而来的,它们最终在与地表的摩擦过程中消耗殆尽。一组来自哈佛大学的研究者通过研究全球数千

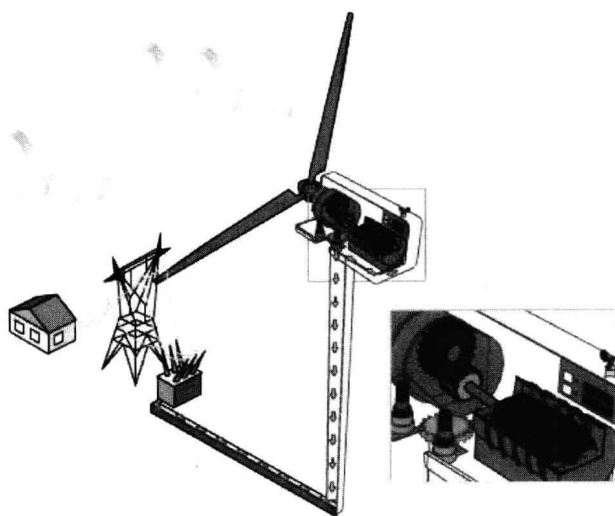


图 1-4 风力发电机发电原理简图与电力输送过程

个气象站提供的统计数据后发现,全世界所蕴藏的风能总量要比原先估计的大得多,甚至达到现在全球能源消耗总量的 40 倍^[5]。

随着可再生能源产业的兴起,全世界对气候变化的关注也在逐步增长。风力发电机持续不断的研发与逐年增长的装机容量使得风能已经成为能源供应很重要的一部分。图 1-5 和图 1-6 显示了 1996~2010 年的全球风力发电机年装机容量和累计装机容量^[6]。

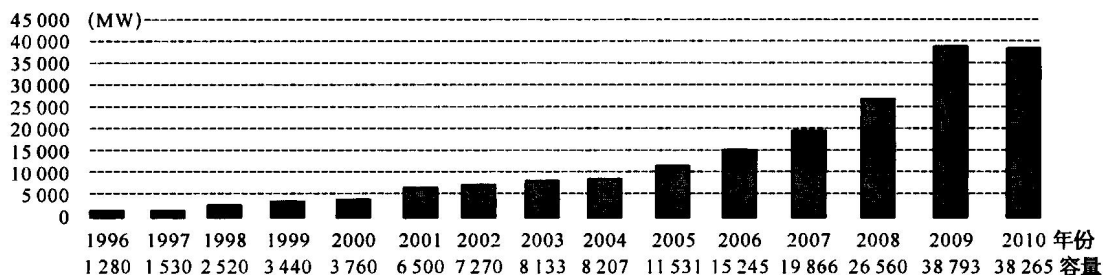


图 1-5 1996~2010 年全球年风力发电机装机容量

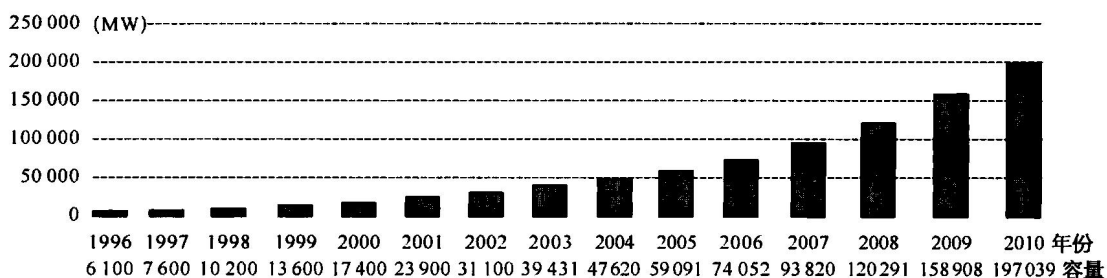


图 1-6 1996~2010 年全球累计风力发电机装机容量

经过2010年的增幅减小后,2011年全球风能市场装机容量增加迅速。据全球风能协会统计,2011年全球新增装机容量达41 000 MW,同年全球累计装机容量达到了238 000 MW,这意味着全球装机容量实现了21%的年增长率。

与此同时,中国、美国和印度仍然是2011年度排名前三的风力发电机市场,如图1-7所示。中国作为最大的风力发电机市场,其市场占有率达到43.3%;紧随其后的美国市场占有率为16.7%,接着是市场占有率7.4%的印度市场^[7]。这些国家政府对风能的支持政策,在帮助提高风能产业增长方面起到了积极的作用。

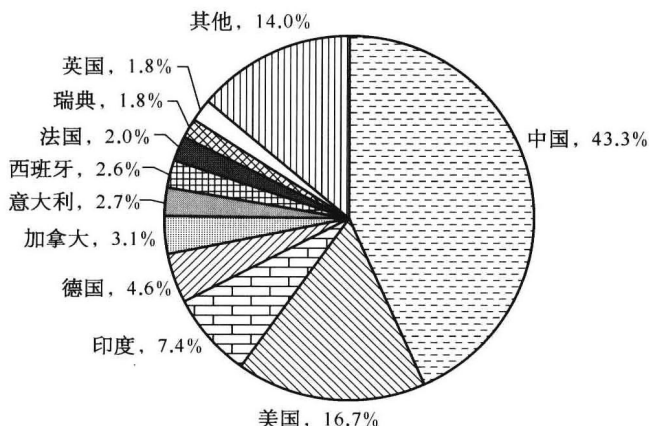


图 1-7 2011 年各国全球风力发电机市场占有率

另外,如图1-8所示,2011年全球风力发电机市场份额的77.6%由前十家主机厂占有,而维斯塔斯仍是全球风力发电机行业的龙头企业^[7]。风力发电机供应市场中最引人注目的变化莫过于中国主机厂的市场份额的快速增长。四家中国本土的主机厂牢牢占据着前十名中的四个席位,分别是金风科技(第二)、华锐风电(第六)、国电联合动力(第七)和明阳风电(第十)。

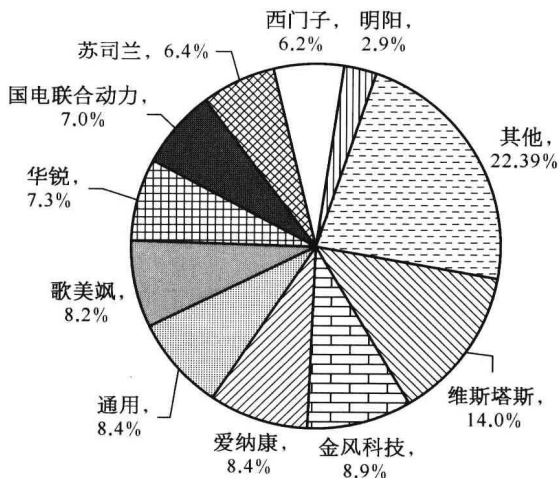


图 1-8 2011 年各企业全球风力发电机市场占有率

然而,作为规模最大的可再生能源,风能行业遭受了经济危机后经济下滑所带来的巨大冲击。全球主流风力发电机主机厂的长期可持续战略依然是投资研发领域,拓展已有的产品组合以应对不断变化的市场需求,不断提高单机容量并整合制造部门满足当地需求。

1.2.2 市场前景

风场作为资本密集型项目需要巨额的资金投入,而一般情况下只有大型公共事业公司或投资集团才能实施如此巨大的投资。因此,业内到 2015 年为止,风能产业的增长速度会比较缓慢。

根据 Golbal Data 发布的市场调查显示,很多原先在 2008 年筹划的项目都搁浅了,因此到 2012 年为止,全球范围内的风力发电机年装机容量会继续保持增长势头,并在 2012 年达到 50 951 MW。一旦这些延误的项目都安装完成,2013 年的年装机容量将下跌到 42 380 MW,并将在 2014 年和 2015 年得到缓慢的恢复,并在 2015 年达到 48 975 MW,如图 1-9 所示。

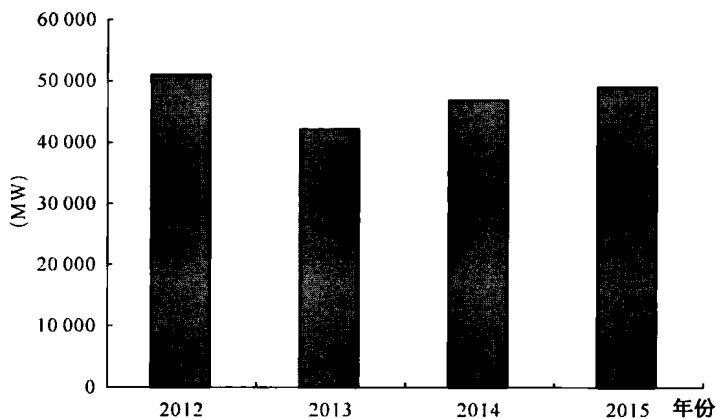


图 1-9 2012~2015 年全球风力发电机年安装容量预测

根据全球风能协会的预测,中国市场将在十年后步入稳定期,但仍将在现阶段的水平下滞留若干年;而印度则有望在 2015 年实现新增装机容量达到 5 GW;刚遭受过核泄漏灾难的日本将很有可能重新考虑发展风电产业;欧洲市场仍将一如既往地平稳,不会有大的波折;北美市场将在接下来几年势头强劲,而拉丁美洲市场将依托其扎实的制造实力走向国际化。

目前风力发电机的一大主流发展趋势是从陆地走向海洋,并实现单机容量的大兆瓦级化。陆上风力发电机已经以不同形式存在了数百年之久,相比之下,海上风力发电机则显得尤为年轻。通常海风的速度要比在陆地上大很多,因此它具有更大的发电潜力,这也是为什么海上风力发电机要比陆上风力发电机大的原因。尽管今天大型的海上风力发电机已经达到 7 MW 级,但很显然制造商还会开发和安装更大容量的风力发电机。据估计,最大的风力发电机容量可以达到 15 MW 左右,叶轮直径将接近 200 m。另外,像德国这