

专著 西北工业大学
出版资助项目
基金 ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

风力发电技术

ZHUANZHU

廖明夫 R.Gasch J.Twele 编著

西北工业大学出版社

西北工业大学出版基金资助项目

风力发电技术

廖明夫 R. Gasch J. Twele 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍了风力发电技术的发展历史、现状,全面总结了风力机的设计概念、不同结构和特点,详细阐述和分析了风力发电技术所涉及的测风、风场评估、风力机的气动原理、风力机的设计、偏载计算、相似准则、结构动力学、规范和认证、电学基础、控制理论、方案比较、风电接网以及规划、运行和经济性分析等各个方面的知识,其中包括了作者多年来在风电领域研究、研发的实例和经验。特别是风力机的气动和结构设计、相似性原理、结构动力学、接网以及规划、运行等方面的内容,可直接成为工程师的设计指南。另外,书中包含大量的图、表和数据,与正文相得益彰,有助于读者理解和掌握。

本书可作为能源与动力专业的教材使用,也可供风电技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术/廖明夫等编著. —西安:西北工业大学出版社,2009.3
ISBN 978-7-5612-2538-7

I. 风… II. 廖… III. 风力发电 IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 040667 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

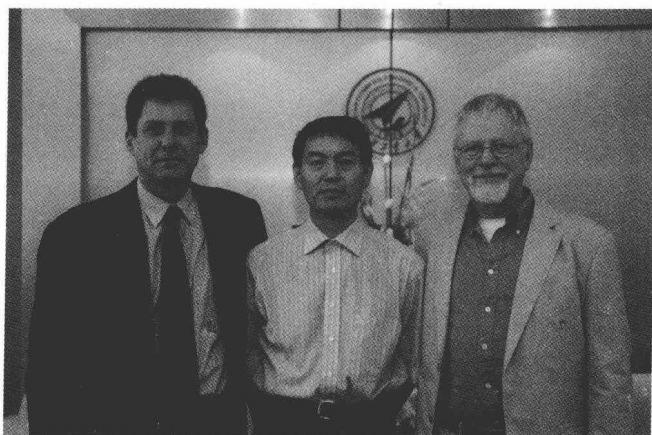
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:20.5

字 数:493 千字

版 次:2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

定 价:36.00 元



友军 摄

廖明夫教授(中),1960年出生,1995年获得西北工业大学和柏林工业大学联合培养博士学位,1996年晋升为西北工业大学动力与能源学院教授。研究领域为航空发动机设计、旋转机械故障诊断和风力发电技术。1997年开始从事风力发电技术的科研和教学工作,与德国国际继续教育与发展基金会合作,培养了数百名风电技术人员。主持研制的“旋转机械状态监测与故障诊断系统”在多家企业获得应用。

R. Gasch教授(右),1936年出生,1972年聘为柏林工业大学宇航研究所教授。研究领域为结构动力学、转子动力学和轨道机车动力学。自1984年开始,在柏林工业大学开设“风力发电技术”专业课程。在20多年的教学和科研中,培养了大批风电技术专业人才。所取得的科研成果被编写在若干教科书中。撰写的专著《风力发电技术》(Windkraftanlagen)于1991年出版后,对德国风电业产生了很大影响,是德国风电工程师人手一册的指导书。自此之后,不断把新的技术成果融入其中,改编出版了5版。其中第5版于2007年7月出版发行。

J. Twele教授(左),1958年出生,1990年获得柏林工业大学博士学位(学位论文:《风力泵的优化设计》)。1984年协助Gasch教授开设风力发电课程,并参与撰写《风力发电技术》专著。1993年创建风力发电机组制造公司——Suedwind,任总经理,设计制造了300~500 kW的风力机,并在印度、德国装机运行。他具有丰富的风力机设计、制造经验,曾任德国风电协会办公室主任。2005年受聘为德国柏林技术学院教授,专门从事风力发电和再生能源领域的教学和科研。

序

风能作为一种可再生能源受到全球越来越多的关注。风力发电技术的快速发展、风电装机容量的高速增长体现了国际社会应对气候变迁、环境恶化、资源短缺挑战的共识和行动。自2003年开始,德国国际继续教育与发展基金会(InWEnt)与中国西北工业大学合作,共同实施“中德风力发电技术”联合培训项目,旨在为中国风电业的发展提供人才支持。截至2008年,共培训中国风电技术人员400多人次,其中众多的学员已经成为中国风电行业的骨干,为中国风电业的发展做出了贡献。

本书的3位编者是培训的主要教师。在培训中,本书的内容是培训的基础教材。同时,在培训过程中,结合最新的技术发展和教学实践,编者对本书的内容进行了进一步的扩充和完善。

本书的特点:

(1)全面系统。风力发电技术涉及气象、气动、结构、材料、力学、电学、电力电子、控制、接网以及规划等多个学科领域。3位作者专业各有侧重,优势互补,而且都为多年从事风电的专家,因此,能够全面系统地介绍各个学科的相关知识。

(2)学术水平高。本书不仅深入地阐述了风电技术相关的基础知识,而且还包含作者最新的研究成果。例如,Schmitz理论与Glauert理论的比较、发电机的相似性准则、传动系统扭振的相似准则、风力机控制率等内容皆为新理论,目前在其他著作中未见表述。

(3)实际数据、实例和经验丰富。书中包含丰富的风电统计数据、风力机结构实例、设计实例、设计参数范围、不同实际机型的比较以及计算方法等,有助于读者理解知识和应用知识。

(4)图表并茂,运用恰当。本书共有插图约320幅,表格32个,配合正文,使读者更加易于理解、易于掌握。

本书系统地介绍了风力发电技术的发展历史、现状,全面总结了风力机的设计概念、不同结构和特点,详细阐述和分析了风力发电技术所涉及的测风、风场评估、风力机的气动原理、风力机的设计、偏载计算、相似准则、结构动力学、规范和认证、电学基础、控制理论、方案比较、风电接网以及规划、运行和经济性分析等各个方面的知识,其中包含了作者多年在风电领域研究、研发的实例和经验。特别是风力机的气动和结构设计、相似性原理、结构动力学、接网以及规划、运行等方面的内容可直接成为工程师的设计指南。本书章节相对独立,不仅可用做高校能源与动力专业的教材,而且也可作为风电工程师们的指导手册。

Klaus Knecht

德国国际继续教育与发展基金会(InWEnt)

2008年10月于柏林

前 言

在当今能源日渐短缺、气候急剧变化、环境日益恶化的全球背景下,风能作为可再生能源受到各国高度关注。近 15 年来,全球风电增长均持续超过 25%。我国风能资源非常丰富,居世界第三位。从 2001 年起,我国就把风能作为主要的新能源形式,列入重点发展领域。自 2001 年以来,风电装机增长率持续超过 48%,出现前所未有的快速发展。风力发电技术属于新兴的交叉学科领域。我国在风力发电技术的人才储备、技术和装备基础等方面较薄弱,出现了能力建设跟不上需求发展的困境。缺乏风电专业指导书和专业教材是风能利用领域能力建设的“瓶颈”之一。

为此,作者在长期从事风力发电技术人才培养和科学研究的基础上撰写了本书,旨在为风电专业人员提供指导书,为风电专业教育提供专业参考教材,以满足当前人才培养之急需。

本书共分 15 章。

第 1 章介绍风能利用和风电技术的发展现状。

第 2 章介绍风能利用的历史。

第 3 章引入风力机的基本原理。对不具备气体动力学专业基础的读者,掌握了本章的内容之后,就较容易理解诸如测风、风力机结构、发电机和控制等方面的知识。

第 4 章详细介绍了风力机的结构,比较了不同的设计方案,分析了叶片、轮毂、传动系统、塔架和地基等主要部件的结构类型、材料、工艺和经济性。本章可作为独立的章节,为风力机整体方案设计和结构设计提供参考。

第 5 章是测风和风场评估的基础。风电项目是否能取得成功的关键在于风况条件的优劣。因此,本章首先介绍风的形成和特性,描述了地面边界层、地形、地貌以及建筑物对风速的影响;然后引入确定风频分布和计算发电量的方法;最后介绍测风。

第 6 章介绍 Betz 和 Schmitz 的风机设计理论。分析了 3 种气动损失,讨论叶片实际设计中要考虑的因素,证明 Schmitz 理论和 Glauert 理论的一致性。

第 7 章介绍风力机偏载特性。以叶片基元法为基础计算风力机偏离设计点时的功率系数、推力系数和力矩系数。这是风力机载荷计算和控制的基础。在低叶尖速比和高叶尖速比区域,用基于叶片基元法的直接迭代计算难以确定风力机的偏载特性。这是因为此时简单迭代算法依据的线性动量定理不完全成立,另外,气动阻力需要加以考虑。本章利用 Prandtl 的翼型理论和 Glauert 的经验公式,建立了改进的偏载特性计算方法,其中考虑了阻力的影响。

第 8 章介绍风力机机型放大的相似准则。对于系列风力机的研制,成功的经验是以成熟机型作为原型机进行放大的,这有助于继承优点,积累经验,缩短研制周期。本章给出机型放大的相似准则,系统地分析相似放大之后风力机功率、载荷、振动模态等参数的变化规律,帮助设计师对放大之后的机型给出较准确的估计。

第 9 章介绍风力机的结构动力学。首先描述风力机激振源的类型、激振机理和激振频率;然后分析塔架-机舱系统、叶片和传动系统的振动,介绍风力机整机建模的原则、方法,并给出传动系统的几个动力学模型;最后讨论风力机整机动力学响应的数字仿真。这些基本知识是

风力机动力学设计的基础。

第 10 章介绍风力发电机组设计和验证的标准与规范。首先列举出目前有关风力发电机组的国际规范和标准;然后重点介绍 IEC 61400-1 关于风速分级和风电机组设计要求的内容,描述风力发电机组设计验证的要求、局部安全系数的概念、验证的内容和方法;最后给出塔架、轮毂和叶片设计验证的实例。

第 11 章为风力发电机组的电学基础。为使不直接从事电器设计的工程师也能够获得清晰的理解,本章从电磁感应的基础知识出发,系统地介绍同步和异步电机的原理和特性,描述大功率元件的功能和简单的整流电路,介绍变压器的原理和在风电机组中的应用。

第 12 章系统地介绍风力发电机组的控制和运行。首先提出控制系统的目标和任务,针对变桨变速风机的空载、偏载、额定载荷及在飓风时的切出,讨论了相应的控制策略;然后比较失速控制,包括主动失速控制(顺风变桨)和变桨控制(迎风变桨)的特点;最后介绍 P-I 和 P-I-D 控制器的性能及其在风电机组控制系统中的应用,特别是建立了风电机组偏载时的最优控制率,可直接应用在风力机的控制中。

第 13 章根据并网发电的要求,比较可变发电机转差型、直驱型以及双馈型风电机组的特点,给出三种实际机型的功率曲线和功率系数曲线比较实例。

第 14 章以德国的情况为基础,讨论风力发电机组在电网上的运行。首先从联合电网的角度出发,描述风力发电机组并网和在网上运行的问题,并且阐明电网和风力发电机组的界面;然后从电网可容性的视角来分析各种风力发电机组的优缺点。

第 15 章介绍风电项目实施的工作步骤与内容——规划、立项、建设与运行,分析在项目实施的每一阶段所涉及的技术方面、法规方面和经济方面的诸多因素,列举了一系列德国风电业的实例和数据,可作为风场规划、运行和经济性分析的借鉴和参考。

本书第 1 章由 R. Gasch, J. Twele 和廖明夫编写;第 2 章由 R. Gasch 和 M. Schubert 编写,廖明夫编译;第 3 章由 R. Gasch 和 M. Schubert 编写,廖明夫编译;第 4 章由 J. Twele, M. Schubert, C. Heilmann 编写,廖明夫编译;第 5 章由 W. Langreder, P. Bade 和廖明夫编写;第 6 章由 R. Gasch, J. Maurer, C. Heilmann 编写,廖明夫编译;第 7 章由 J. Maurer, K. Kaiser, C. Heilmann 和廖明夫编写;第 8 章由 R. Gasch 和廖明夫编写;第 9 章由 M. Kuehn, R. Gasch 和 B. Sundermann 编写,廖明夫编译;第 10 章由 A. Reuter 和廖明夫编写;第 11 章由 W. Conrad, R. Gasch 和廖明夫编写;第 12 章由 W. Conrad, R. Gasch 和 A. Stoffel 编写,廖明夫编译;第 13 章由 W. Conrad 和 R. Gasch 编写,廖明夫编译;第 14 章由 J. Twele 和 C. Heilmann 编写,廖明夫编译;第 15 章由 J. Twele 和 J. Liersch 编写,廖明夫编译。

在本书编写和出版过程中,得到德国国际继续教育与发展基金会(InWEnt)、中国可再生能源规模化发展项目(CRESP)以及西北工业大学的鼎力支持。西北工业大学的吴斌硕士复绘了书中的所有曲线图,施鹏飞教授提供了中国风电统计数据。作者在此一并致谢。

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,诚请广大读者批评指正。

廖明夫

2008 年 12 月

目 录

第 1 章 风力发电技术.....	1
1.1 风电的发展	1
1.2 能源和电力需求	3
1.3 政府的能源政策	8
1.4 技术发展	9
参考文献	11
第 2 章 风能利用的历史	12
2.1 竖轴风机.....	12
2.2 水平轴风机.....	14
参考文献	22
第 3 章 风力机的基本理论	24
3.1 风功率.....	24
3.2 阻力风机.....	25
3.3 升力风机.....	28
3.4 阻力风机与升力风机的比较.....	30
参考文献	31
第 4 章 风力发电机组的结构设计	33
4.1 叶轮.....	34
4.2 传动系统.....	48
4.3 辅助机构和特殊装置.....	60
4.4 塔架和地基.....	65
4.5 制造与装配.....	71
4.6 风机的数据.....	72
参考文献	76

第 5 章 风特性、风功率和测风	79
5.1 风的形成	79
5.2 大气边界层	82
5.3 风功率、能量及载荷的评估计算	98
5.4 测风和数据评估	107
参考文献	111
第 6 章 Betz 和 Schmitz 理论	114
6.1 风含功率	114
6.2 翼型理论	118
6.3 气体在旋翼的流动及气动力	121
6.4 Betz 最佳设计	123
6.5 损失	126
6.6 考虑出风旋转时的 Schmitz 设计	128
6.7 旋转损失	132
6.8 叶片设计中要考虑的因素	133
6.9 总结	135
参考文献	137
第 7 章 风力机性能计算及偏载特性	139
7.1 性能计算方法	139
7.2 特性曲线的无量纲描述	141
7.3 快速风力机的特性曲线	142
7.4 风力机的特性场	144
7.5 快速风力机的变桨特性	145
7.6 扩展算法	148
7.7 叶片基元法的局限和三维计算方法	153
参考文献	157
第 8 章 模拟原理及相似准则	159
8.1 相似理论的应用	159
8.2 弯曲应力	161
8.3 离心力在叶根产生的拉伸应力	162
8.4 重力在叶根产生的弯曲应力	163
8.5 叶片自振频率和频率比的变化	164

8.6 气动阻尼	165
8.7 发电机的放大原则	166
8.8 放大原则在直驱风机发电机上的应用	167
8.9 传动系统放大后的扭转振动	167
8.10 风机的放大边界	169
参考文献	170
第9章 风力机结构动力学	171
9.1 激振源	171
9.2 风力机的自由振动和受迫振动	177
9.3 整机动力学仿真	187
9.4 实验验证	189
参考文献	191
第10章 风力发电机组的标准和认证	192
10.1 认证	192
10.2 验证	195
10.3 验证实例:钢筒塔架——单轴应力状态和各向同性材料	198
10.4 轮毂多轴应力状态的校核——材料各向同性	200
10.5 单轴应力状态和各向异性材料叶片的验证	203
参考文献	206
第11章 风力发电机组的电学基础	207
11.1 交流电机	209
11.2 交流电机、电机结构和三相同步电机	219
11.3 风力机的大功率电子元件——整流器	227
参考文献	232
第12章 风力发电机组的控制和运行	234
12.1 对传动系统施加影响的可能性	237
12.2 传感器和作动器	242
12.3 控制器和控制系统	242
12.4 变速变桨风力机的控制律	243
12.5 控制器的设计	244
12.6 简单机械式控制的实例	245

12.7 风力机控制系统的微分方程及其在工作点的线化.....	249
参考文献.....	251
第 13 章 风力机的类型及应用	254
13.1 并网风力机.....	254
13.2 独立运行的风力机和岛屿风力机.....	265
13.3 互补风力机.....	273
参考文献.....	277
第 14 章 风力发电机组在联合电网上的运行	278
14.1 联合电网.....	278
14.2 联合电网中的风力发电机组.....	284
参考文献.....	290
第 15 章 风场规划、运行和经济性分析.....	292
15.1 风电场的规划与立项.....	292
15.2 建设和运行.....	303
参考文献.....	316

第 1 章 风力发电技术

气候变迁、环境恶化、资源短缺已经成为人类生存和发展的挑战,而发展包括风能在内的可再生能源则是应对挑战的重要策略。风力发电技术的快速发展和风电装机容量的高速增长体现了众多国家的共识和行动。本章将概括地介绍近年来风电的发展状况,从市场的急剧增加和风电机组单机容量的增大阐述风力发电的动因和由此所带来的效应。风能既是可再生能源,又是“政策性能源”,即风能利用的规模和水平取决于国家的宏观目标。本章将以中国、德国等国家为例,说明制定合适的政策、法规对风电的发展会起到决定性的推动作用。

1.1 风电的发展

如图 1.1 所示,在过去的 20 多年中,系列风力机的直径和额定功率快速增加。例如,在 1983 年,一台风力机的直径为 15 m,发电机功率为 55 kW;而到了 2005 年,直径为 90 m,功率为 2 500 kW 的风力机已成为成熟的批产机型;直径为 126 m,功率为 5 000 kW 的样机已在试运行之中。此时,风力机的可利用率达到了 97%,甚至更高。简而言之,在很短的时间之内,风力发电技术得到高速发展,并且获得了大规模的应用,形成了具有影响力的能源产业。

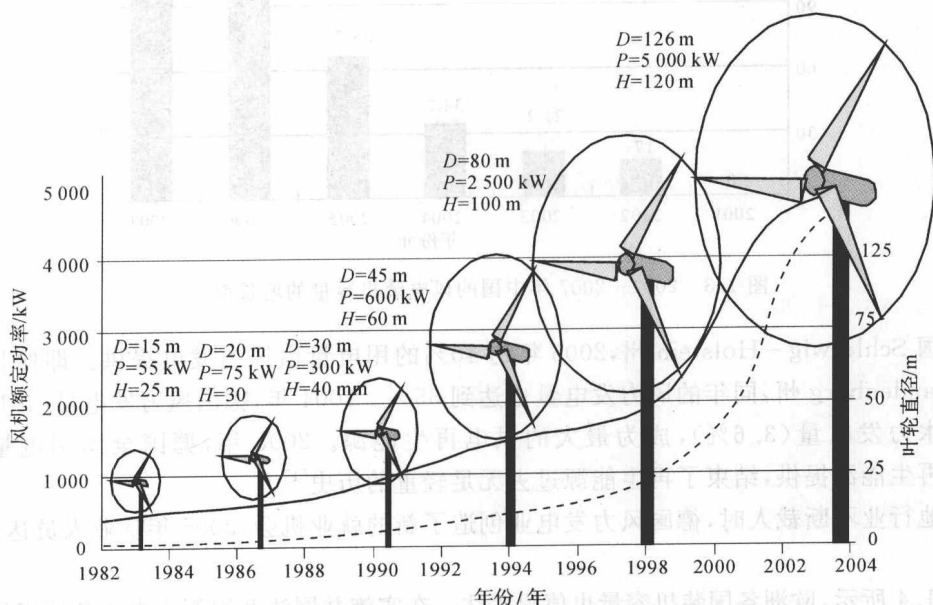


图 1.1 风力机尺寸和额定功率的增大

1986 年中国在山东荣成建成第一个风电场,安装了 3 台 55 kW 的风电机组。自此之后,在全国各地陆续建设了一批风电场。截至 2007 年底,共建成 158 个风电场,累计装机容量为

5 906 MW,最大单机容量为 2 MW。图 1.2 和图 1.3 分别表示自 2001 年以来中国的风电装机容量及其增长率。由图可见,进入本世纪之后,中国风电装机容量持续高增长,已经成为全球有影响的风电市场之一。通过一系列的国家支持计划、科技攻关和技术引进,目前,中国基本掌握了 1.5 MW 风电机组的制造技术,初步形成了生产叶片、齿轮箱、发电机和控制系统等主要部件的产业链。

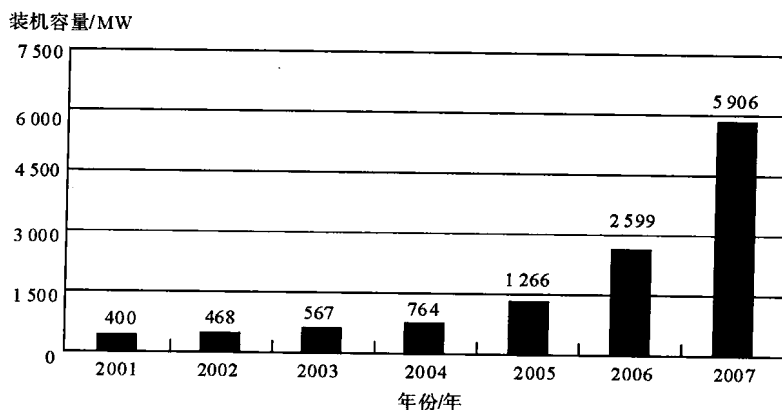


图 1.2 2001—2007 年中国的风电装机容量

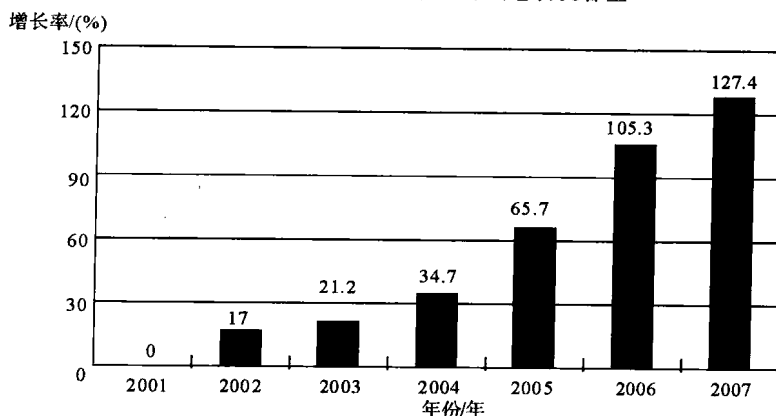


图 1.3 2001—2007 年中国的风电装机容量的增长率

在德国 Schleswig - Holstein 州,2006 年约 40%的用电量由风力发电提供。即便是地处内陆的 Brandenburg 州,同年的风力发电量也达到 35%。2004 年,德国风力发电量(4.1%)首次超过了水力发电量(3.6%),成为最大的供电再生能源。2005 年,德国全国用电量的约 10.2%由再生能源提供,结束了再生能源过去无足轻重的历史^[1]。

在其他行业不断裁人时,德国风力发电业创造了新的就业机会,2005 年从业人员达到约 6 万人^[2]。

如图 1.4 所示,欧洲各国装机容量也值得关注。在实施并网法并限制大电力集团垄断的国家,开辟了风力发电市场,技术人员和投资商都积极发展新技术。在丹麦(1981 年实施并网法)、德国(1991 年实施并网法)和西班牙(1993 年实施并网法),风力发电达到了供电量的可观份额,占到欧洲风电装机容量的 80%以上,他们建立了一个市场份额在不断增长的行业,引领着世界风电技术向前发展。近几年,中国和印度的风电市场异军突起,成为最具活力的增长点,如图 1.3

和图 1.5 所示。欧洲、美国、中国和印度在未来的若干年仍将是风能利用的最大市场。

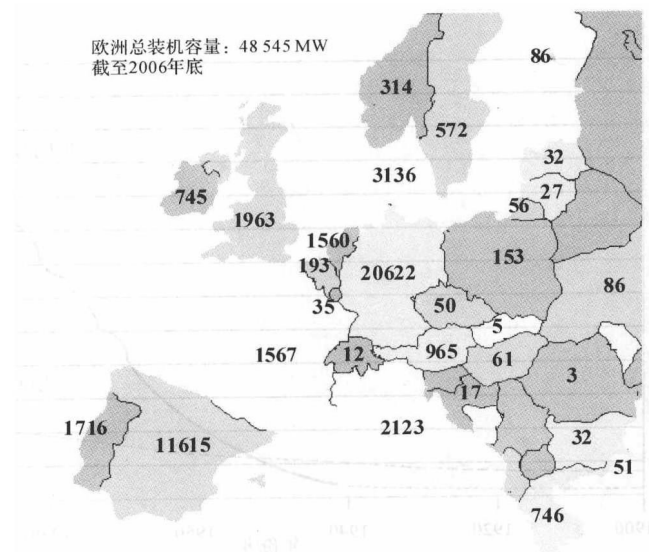


图 1.4 截至 2006 年底欧洲各国风力发电装机容量(单位:MW)

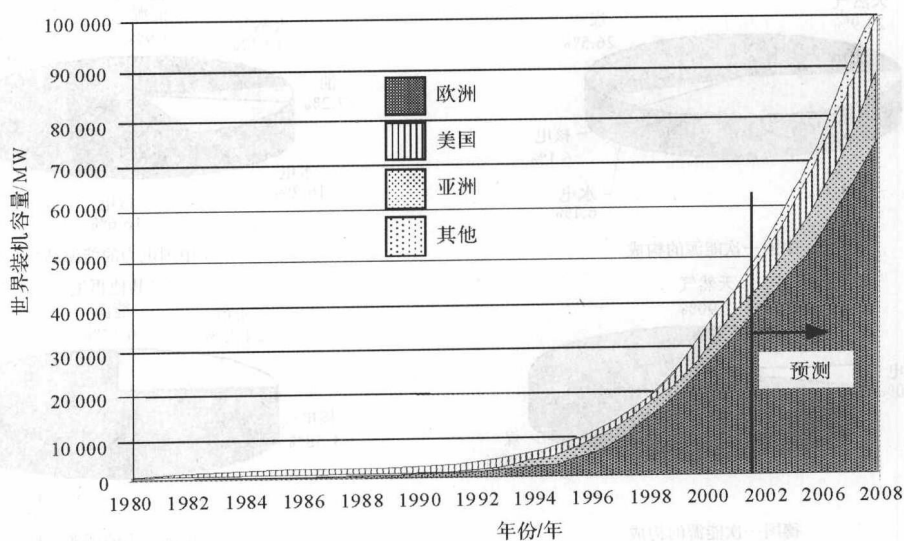


图 1.5 世界风力发电装机容量的增长^[3]

在风能资源丰富的英国和法国,相比之下作为不大,因为缺乏有利于再生能源发展的政治愿望。这点将在 1.3 节详述。

1.2 能源和电力需求

图 1.6 表示近 100 年来世界人口和电力消耗的增长。能源需求的 75% 仍然得靠诸如煤、石油和天然气等化石能源,如图 1.7 所示。这些化石能源的燃烧释放大量的有害物质,其对环

境和气候的影响人类早已有所感受。

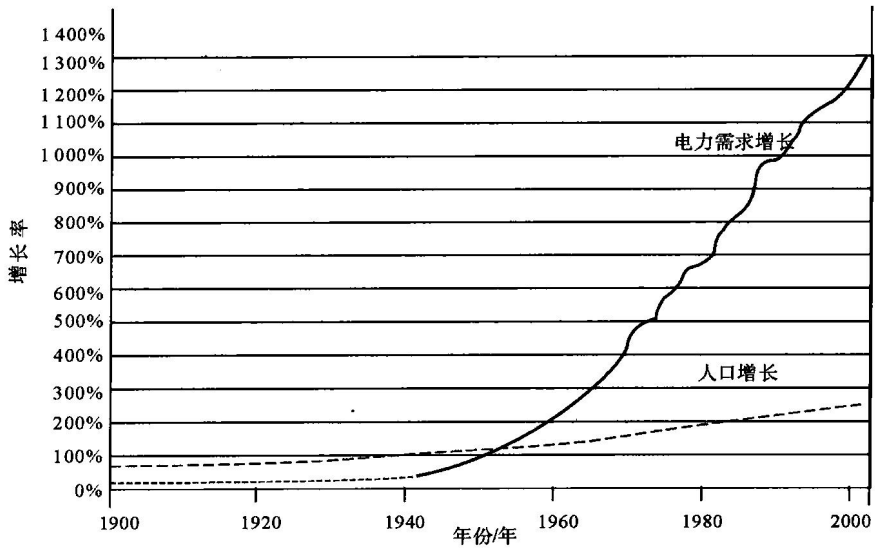


图 1.6 世界人口和电力需求的增长^[4]

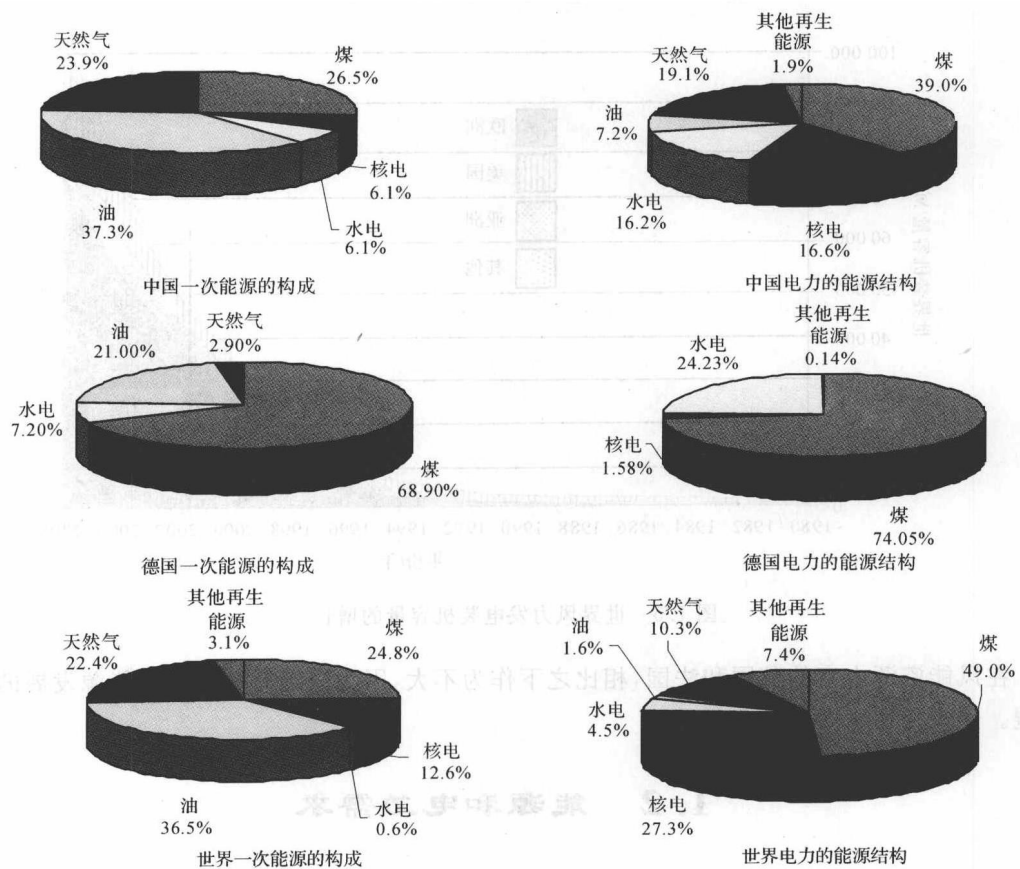


图 1.7 世界(2003 年)、中国(2006 年)和德国(2003 年)一次能源的构成和电力的能源结构^[5]

即使核电,也是问题严重。核电设备运行 35 年以后,世界上没有什么地方能够满意地解决核垃圾的处理问题。1979 年美国 Harrisburg 核电站的核熔化;1986 年乌克兰切尔诺贝利的核事故;还有 2005 年英国 Sellafield 的二次净化设施出现灾难,200 kg 燃料泄漏。上述事件的发生说明,“一切可能发生的事情都会发生”。

另外,核电站就像 2001 年 9 月 11 日的纽约世贸大厦一样可能成为恐怖袭击的理想目标。政治家们和核电厂业主们处在这样一个新的风险之下。

表 1.1 列出了几个国家人口增长率和人均用电量。表 1.1 给出两点启示。首先,表中的数据驳斥了以往听到的说法:用电量随着工业国家生活水平的提高而增长。美国、德国和丹麦的生活水平基本相当,但人均用电量美国为 $13\,512\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{人}$;德国为 $6\,369\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{人}$;丹麦为 $6\,574\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{人}$ 。由此可见,提高能效,节约能源效果显著。

表 1.1 几个代表性国家的用电量^[5,6]

国家	人口数量 (2004 年) 10^6 人	消耗的总电量 (2004 年) $\text{MW}\cdot\text{h}$	平均每个居民 消耗的电量 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{人}$	人口增长速度 %	电量消耗的 增长速度 %
丹 麦	5.4	35.5	6 574	0.1	0.3
德 国	82.6	526.1	6 369	-0.2	0.2
美 国	293.6	3 967.2	13 512	0.6	0.9
中 国	1 300.1	1 686.0	1 297	0.6	15.5
印 度	1 086.6	417.5	384	1.7	2.4

美国占世界人口的 4.6%,却释放出 24%的影响世界气候的温室气体;德国占世界人口的 1.3%,只释放 3.4%的温室气体,与美国相比,德国排放量要少得多。仅在 2005 年,通过再生能源的利用,德国减少温室气体的排放量就达到 8 400 万 t。当年,德国总排放量为 83 000 万 t (人均约 10 t),减少 10%,为实现《京都议定书》承诺发挥了作用^[1]。

另外,表 1.1 说明,发达国家利用再生能源的动机和印度、巴西、中国等发展中国家是不同的。在发达国家,人口几乎不增长,原则上现有的电力供应系统能够满足需求;但其已经老化,故运行效率不是很高,同时安全防护技术也已老化,耗费化石燃料会释放大量的二氧化碳。减少二氧化碳排放量,并且期望降低对来自政治不稳定地区的原油和天然气的依赖,是利用风力、水力和太阳能发电的主要动因。同时,这种高度分散的供电形式也减小了恐怖袭击的威胁。

而人口众多的发展中国家发展再生能源的动机却有另外的考虑。人均用电量低、持续十几年以年增长率 6%~9%的高速增长以及还在不断增长的人口,使得电力供应紧张。因此,不论是化石能源、核能还是再生能源,都宜作为供电的能源形式。

发达国家曾经一直是发展中国家的榜样,因此,带头发展和利用再生能源很重要。如果中国和印度目前的能源结构和用量达到发达国家的水平,全球气候变暖、环境恶化就会更快加剧。表 1.2 给出了化石能和核能发电所排放的有害物质和温室气体的情况。

表 1.2 发电产生的不同有害物质排放量的比较(括号内的数值是在利用现代过滤技术后得到的)

能源形式		CO ₂	SO ₂	NO _x	粉尘	核垃圾
		g · (kW · h) ⁻¹	g · (kW · h) ⁻¹	g · (kW · h) ⁻¹	g · (kW · h) ⁻¹	mg · (kW · h) ⁻¹
化石能源	煤炭	977 ^①	5~9	3~6	25 ^②	—
	(经过过滤器)	(977)	(0.8) ^③	(0.8) ^③	(0.1) ^④	—
	油	730	1~4.2 ^③ ~12	2~5 ^④	(0.1)	—
	(经过过滤器)	(730)	(0.8) ^③	(0.8)	(0.1)	—
核能	气	419 ^①	0.05	2~4 ^④	(0.01) ^④	—
	(经过过滤器)	(419)	(0.01) ^③	(0.7) ^④	(0.01) ^④	—
核能	原子	—	—	—	—	4

注:①DEWI^[7];②Strauss^[8];③1%硫含量;④Heitmann^[9]。

能源结构向风能、太阳能、水能、生物能等再生能源转化得越快,稳定全球气候变迁的可能性就越大。

在人口密集的欧洲,发电所用的陆地面积是一个很重要的因素。表 1.3 给出了水、煤和风力发电所用面积的比较。

在表 1.3 中,对于褐煤发电,计算发电厂的功率和煤矿露天开采的面积。在德国,开采褐煤使得大小为 Saarland 州面积的地域荒漠化。对于水电站,以水库的面积来计算。而对于风力发电,为简单起见,则以叶轮的面积为基准。显而易见,叶轮面积要比风力机实际占的土地大得多(如地基)。

还值得关注的是,可再生能源发电装置需要运行多长时间能够把建造这些装置所耗费的电力回收回来,如表 1.4 所示。

与传统、集中的化石能源或者核能发电相比,分散在多个地域的分散式发电会为当地创造更多的就业机会。

如前所述,2005 年德国风电业就业人员约 6 万人。2005 年整个可再生能源领域从业人数为 17 万人^[1]。

表 1.3 水、煤和风力发电所用面积的比较

类型	地点	数据	电能产量
水电	Itaipu 1985 (巴西)	12 600 MW H=200 m	6 W/m ²
	Spiez 1986 (瑞士)	23 MW H=65 m	87 W/m ² (每平方米地表面积)
褐煤发电	Schkopau 1996 (德国)	1 000 MW	8 W/m ²
	Schwarze Pumpe 1998 (德国)	1 600 MW	16 W/m ²
	Buschhaus 1985 (德国)	380 MW	31 W/m ² (每平方米开采面积)
风电	德国	风速=4.5~6.0 m/s	50~120 W/m ² (每平方米叶轮面积; 地基面积比叶轮面积小 10 倍)