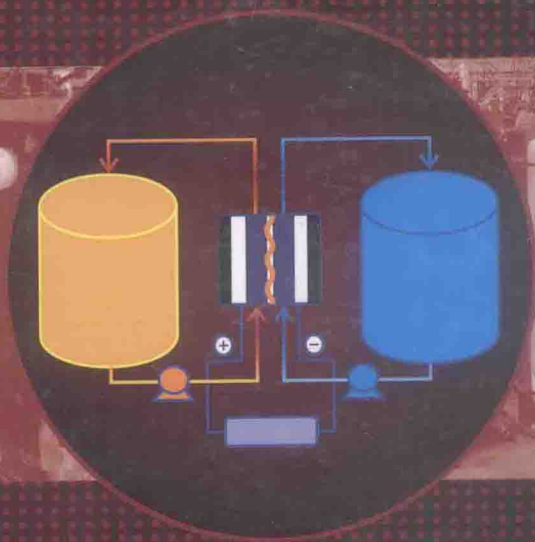


# 液流电池技术

Flow Battery Technology

张华民 编著



化学工业出版社

本书由

大连市学术著作出版基金资助出版

The published book is sponsored by  
the Dalian Evaluation Committee for  
Publishing Academic Works Financed

# 液流电池技术

Flow Battery Technology

张华民 编著



化学工业出版社

液流电池技术由于具有储能规模大、安全性高、充放电循环寿命长、生命周期中性价比高、环境负荷小、电池材料可循环利用、环境友好等优点,近年来越来越得到世界各国的重视,有十分巨大的市场前景。本书简述了能源和储能技术的发展背景,从原理、技术现状及发展趋势方面介绍了各种储能电池分类及其特点,全面而详细地介绍了各类液流电池技术,重点阐述了液流电池关键材料、核心部件、电化学基础、电池系统管理与控制、电池应用及前景与挑战,还对近年来运行的多项不同规模液流电池示范项目等具体案例进行了详细介绍。

本书适合于大规模储能技术、智能电网技术研究开发和应用的工程技术人员,高等院校、科研院所从事储能技术研究的人员和研究生阅读和参考,还可供从事液流电池以及新能源材料研究、开发、生产和使用的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

液流电池技术/张华民编著. —北京:化学工业出版社, 2014.10  
ISBN 978-7-122-21648-9

I. ①液… II. ①张… III. ①化学电池 IV. ①0646.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第193900号

责任编辑:朱 彤  
责任校对:边 涛

文字编辑:王 琪  
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 字数405千字 2015年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00元

版权所有 违者必究

# 序一

随着人类生产的发展和生活水平的不断提高，能源需求也随之进一步提高。以化石能源为主的传统能源供应结构，无法支撑人类的可持续发展，因此需要普及应用可再生能源，提高其在能源供应结构中的比例，使可再生能源逐步由辅助能源转化为主导能源，支撑人类社会的可持续发展。可再生能源主要包括风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、潮汐能等，其中尤以太阳能和风能的开发和利用被人们寄予厚望。但是，风能、太阳能自身的不稳定、不连续性对电网产生严重冲击。大规模高效储能技术是实现可再生能源发电规模化利用的关键技术，也是建设智能电网，提高电网对不连续、不稳定的可再生能源发电接纳能力的瓶颈技术，是国家实现能源安全、经济可持续发展的重大需求。

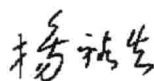
近年来，大规模储能技术的研究开发得到了各国能源、电力等相关部门的高度重视。大规模储能技术的普及应用对解决电网对风能发电、太阳能光伏发电的接纳，减少“弃风”、“弃光”，缓解电网巨大的峰谷差造成的调峰压力，降低发电厂和输电线路扩容建设巨额投资具有重要意义。迄今为止，人们已经探索和研究开发出多种储能技术，这些储能技术各有各的特点，且适用于不同的领域。液流电池技术具有使用寿命长、储能规模大、充放电切换应答迅速、安全可靠、环境友好等突出的优势，成为规模储能的首选技术之一。

本书作者中国科学院大连化学物理研究所张华民研究员自2000年起率领研究团队先后从事了多硫化钠/溴液流电池、全钒液流电池、锌/溴液流电池和锌/镍液流电池的电解质溶液、电极双极板、新型离子交换（传导）膜等关键材料以及电池电堆等核心部件的研究和工程开发，液流电池储能模块和大规模液流电池的系统设计、制造、集成及控制管理技术的研究开发以及其工程化、产业化技术平台建设及应用示范，使我国液流电池储能技术水平达到了国际领先水平。

这本《液流电池技术》一书从液流电池研究背景、学术及技术现状和发展趋势角度出发，结合国内外研究现状，从储能电池分类及其特点，全面而详细介绍了各类液流电池技术的原理和特点，重点阐述了液流电池关键材料、电化学基础、电池电堆、储能模块、储能系统及电池管理控制，应用现状及前景与挑战。该书从储能技术发展趋势和国家持续发展的需求出发，选择了该研究团队近年来运行的多项不同规模液流电池示范项目等具体案例进行详细叙述。该书文笔流畅，实用性很强，可读性强。

相信《液流电池技术》一书的出版将对从事可再生能源应用、能源管理、能源化工和液流电池储能技术领域的工程技术人员以及高校相关专业的师生、电池应用人员等有所裨益。更希望该书的出版，能够推动和促进我国储能技术的研究、开发以及储能技术应用的快速发展。

中国工程院院士  
杨裕生



2014年10月

## 序二

电能是现代社会人类生产、生活中必不可缺的二次能源，随着社会经济的发展，人们对电能的需求量越来越大。一方面，尽管电能需求昼夜相差很大，但发电厂的建设规模必须满足用电高峰的需求，这使得电力系统的投资大、利用率低且能源效率低。另一方面，随着化石能源的不断枯竭，人们对风能、太阳能、海洋能等可再生能源的开发和利用越来越广泛。然而风能、太阳能等可再生能源发电具有明显的不连续、不稳定、不可控的非稳态特性。可再生能源发电的普及应用，面临着电网接入和消纳问题。储能技术是解决风能、太阳能等可再生能源发电非稳态特性的关键瓶颈技术。

为适应不同应用领域对储能技术的需要，人们已探索和研究开发出多种电力储存（储能）技术，这些储能技术各自具有独特的技术经济性，可适合于大规模储能的技术。化学储能技术主要包括液流电池技术、钠/硫电池技术、锂离子电池技术、铅/碳电池技术等，它们在能源管理、电能质量改善和稳定控制等应用中具有良好的发展前景。在大规模储能技术应用领域有着广阔的市场前景。经过几十年的探索与研究开发，大规模高效液流电池储能技术已经取得了突破性进展，中国、英国、日本及美国等国家已经建造了兆瓦级示范演示系统，得到了各种成功的经验和失败的教训。近年来国内外液流电池产业发展迅速，但目前国内图书市场上尚缺乏系统论述液流电池技术和应用方面的科研书籍，这本《液流电池技术》一书就是在这种形势下出版的。

本书作者张华民研究员具有多年燃料电池和液流电池的研究开发经验，为解决可再生能源应用中的不连续性、不稳定性的非稳态特性，推进可再生能源的普及应用，取得了一系列基础理论和应用技术的重大突破，具有深厚的学术造诣和丰富的实践经验积累。该书视野独特，体系齐全，从电化学、关键材料、电堆及系统、系统管理与控制以及应用的角度出发，全面阐述了各种液流电池技术相关内容，同时以各类电池系统的实例加以详解，并介绍了作者所带领的研究团队最新的研究成果和在国际期刊上发表的研究论文。

本书可读性和实用性强，具有重要的学术价值和应用价值，适合于从事电力、能源、储能技术相关领域的科研人员、工程技术人员、管理人员、高校相关专业的师生阅读。相信本书的出版将对提高我国液流电池储能技术的发展及应用发挥积极的推动作用。

中国工程院院士  
衣宝廉



2014年10月

# 前言

电能是现代社会人类生产和生活中必不可缺的二次能源，随着社会经济的发展，人们对电能的需求量越来越大，然而化石能源逐渐枯竭以及其大量消费带来环境污染，因此，风能、太阳能等可再生能源的开发和应用越来越引起各国的高度重视，可再生能源将逐渐取代传统的化石能源，由辅助能源转为主导能源。

风能、太阳能等可再生能源发电具有明显的不连续、不稳定、不可控的非稳态特性。可再生能源发电的普及应用，面临着电网接入和消纳问题。与煤炭、石油、天然气等一次能源不同，电能不容易大规模直接储存，必须通过能量转换过程来实现电能的储存。大规模储能技术是解决风能、太阳能等可再生能源发电非稳态特性的关键核心技术。

大规模电化学储能技术是指通过电化学反应装置，通过电化学反应实现化学能与电能之间的相互转换，实现电能的大规模储存和释放。液流电池特别是全钒液流电池储能技术，是利用正、负极电解质溶液中钒离子价态的变化，来实现电能的储存和释放。由于其具有储能规模大、安全性高、充放电循环寿命长、生命周期中性价比高、环境负荷小、电池材料可循环利用、环境友好等优点，近年来越来越得到世界各国的重视，发展越来越快，技术越来越成熟，有十分巨大的市场前景。

作者从1982年在日本留学时，就开始燃料电池相关技术的研究，2000年回国后，作者的研究团队先后从事了多硫化钠/溴液流电池、全钒液流电池、锌/溴液流电池和锌/镍液流电池的电解质溶液、电极双极板、新型离子交换（传导）膜等关键材料以及电池电堆等核心部件的研究和工程开发，液流电池储能模块和大规模液流电池的系统设计、制造、集成及控制管理技术的研究开发以及其工程化、产业化技术平台建设及应用示范技术创新，使我国全钒液流电池储能技术处于国际领先水平。先后申报了150余项专利，发表了50余篇学术论文，积累了丰富的研究经验和大量的技术资料。本书是在上述经验积累的基础上撰写的。

本书共分为8章。第1章概要介绍了能源和储能技术发展背景。第2章从原理、技术现状及发展趋势方面介绍了抽水储能、压缩空气储能、锂离子电池、钠/硫电池、钠/镍电池等大规模储能技术。第3章概要介绍了各种液流电池储能技术。第4章介绍了液流电池的电化学基础。第5章~第7章阐述了液流电池关键材料、核心部件、电池系统技术。第8章介绍了液流电池的应用。本书内容涉及电化学、材料科学、新能源技术和化学工程等。本书适合于大规模储能技术、智能电网技术研究开发和应用的工程技术人员，高等院校、科研院所从事储能技术研究的人员和研究生阅读。

本书在撰写过程中，作者的同事和研究生李先锋、赖勤志、马相坤、邹毅、刘宗浩、王晓丽、刘涛、孙晨曦、邢枫、许壮、张洪章、姚川、郑琼、丁聪、程元徽、张立群等为相关章节资料收集、文字和引用文献校对等方面做了大量工作，刘盛林为书稿绘制了大量图表，荣倩对本书进行了合并整理、校对。在此，作者对为本书的撰写做出贡献的同事和学生们表示衷心的感谢。

本书由大连市学术著作出版基金资助出版。大连市学术专著资助出版评审委员会为本书的出版提供了宝贵支持，在此，作者表示衷心的感谢。

由于作者知识积累和学术水平有限，而且液流电池技术发展迅速，因此，书中难免会出现不足和疏漏之处，敬请同行和读者批评指正。

编著者

2014年8月

# 目录

## 第 1 章 能源与储能 1

1.1 能源概述 .....	1
1.2 风能、太阳能可再生能源发电的发展现状 .....	2
1.2.1 光伏电池发电发展现状 .....	4
1.2.2 风能发电发展现状 .....	5
1.3 可再生能源发电的作用 .....	7
1.4 储能技术在可再生能源发电中的作用 .....	7
参考文献 .....	9

## 第 2 章 储能技术 10

2.1 储能技术的分类及应用领域 .....	11
2.2 大规模电池储能技术的要求 .....	11
2.3 抽水储能技术 .....	12
2.3.1 抽水储能技术的原理 .....	12
2.3.2 抽水储能技术现状 .....	14
2.3.3 抽水储能技术发展趋势 .....	15
2.4 压缩空气储能技术 .....	15
2.4.1 压缩空气储能技术的原理 .....	15
2.4.2 压缩空气储能技术现状 .....	17
2.4.3 压缩空气储能技术发展趋势 .....	17
2.5 锂离子电池 .....	18
2.5.1 锂离子电池的原理 .....	19
2.5.2 锂离子电池技术现状 .....	20
2.5.3 锂离子电池技术发展趋势 .....	22
2.6 钠/硫电池 .....	22
2.6.1 钠/硫电池的原理 .....	22
2.6.2 钠/硫电池储能系统 .....	24
2.6.3 钠/硫电池技术现状 .....	25
2.7 钠/镍电池 .....	27
2.7.1 钠/镍电池的原理 .....	27
2.7.2 钠/镍电池储能系统 .....	29

2.7.3 钠/镍电池技术现状 .....	33
2.7.4 钠/镍电池发展趋势 .....	34
参考文献 .....	34

### 第3章

36

#### 液流电池储能技术

3.1 液流电池储能技术的原理 .....	36
3.2 液流电池的结构与组成 .....	38
3.2.1 液流电池单体电池 .....	38
3.2.2 液流电池电堆 .....	38
3.2.3 液流电池单元储能系统模块 .....	39
3.3 液流电池特点、分类 .....	40
3.3.1 液流电池特点 .....	40
3.3.2 液流电池分类 .....	42
3.4 全钒液流电池 .....	43
3.5 锌/溴液流电池 .....	45
3.5.1 溴的渗透性抑制技术研究 .....	46
3.5.2 枝晶生成抑制技术研究 .....	47
3.5.3 电极材料与电池性能研究 .....	47
3.5.4 锌/溴液流电池示范应用 .....	49
3.6 多硫化钠/溴液流电池 .....	50
3.7 锌/镍液流电池 .....	52
3.8 铁/铬液流电池 .....	54
3.9 钒/多卤化物液流电池 .....	54
3.10 锌/铈液流电池 .....	55
3.11 铅酸单液流电池 .....	55
3.12 液流储能电池应用 .....	56
参考文献 .....	56

### 第4章

58

#### 液流电池电化学基础

4.1 电化学基本概念 .....	58
4.1.1 电子导体与离子导体 .....	58
4.1.2 原电池与电解池 .....	59
4.1.3 电解质及离子水化作用、离子氛 .....	60
4.1.4 浓度、活度与活度系数 .....	60
4.1.5 离子淌度与电导率 .....	61
4.1.6 电极/溶液界面结构 .....	61
4.1.7 法拉第定律 .....	62
4.2 电化学热力学 .....	63
4.2.1 相间电位和电极电位 .....	63



4.2.2	绝对电极电位与相对电极电位 .....	64
4.2.3	液体接界电位 .....	66
4.2.4	平衡电极电位、电池电动势与能斯特方程 .....	67
4.2.5	电池电动势与温度、压力的关系 .....	68
4.3	电极过程动力学 .....	68
4.3.1	不可逆的电极过程及速率控制步骤 .....	68
4.3.2	电极电位对电子转移步骤速率的影响 .....	69
4.3.3	稳态极化时的动力学公式 .....	70
4.3.4	多电子转移过程 .....	71
4.3.5	液相传质的方式及稳态扩散过程 .....	72
4.3.6	稳态扩散中的浓差极化 .....	73
4.3.7	电化学极化和浓差极化共存时的动力学规律 .....	74
4.3.8	液流电池的电压损失 .....	74
4.4	电沉积过程 .....	75
4.4.1	金属的阴极过程及电沉积 .....	75
4.4.2	电沉积的可能性和影响因素 .....	76
4.4.3	金属离子的电沉积 .....	77
4.4.4	电结晶过程 .....	77
4.5	电化学研究方法 .....	78
4.5.1	稳态极化曲线 .....	78
4.5.2	循环伏安曲线 .....	79
4.5.3	电化学阻抗方法 .....	81
4.5.4	电位滴定法 .....	82
4.5.5	电池性能测试 .....	83
	参考文献 .....	84

## 第 5 章

85

### 液流电池关键材料

5.1	液流电池电极材料 .....	85
5.1.1	液流电池电极材料分类 .....	86
5.1.2	铁/铬液流电池电极 .....	87
5.1.3	多硫化钠/溴液流电池电极 .....	87
5.1.4	全钒液流电池电极 .....	90
5.1.5	锌/镍液流电池电极 .....	91
5.1.6	全沉积型铅酸液流电池电极 .....	91
5.2	液流电池电极特性及评价方法 .....	92
5.2.1	电极反应影响因素 .....	93
5.2.2	全钒液流电池电极材料 .....	93
5.2.3	电极材料的表征 .....	99
5.3	液流电池双极板材料 .....	102
5.3.1	液流电池双极板材料的功能与作用 .....	102
5.3.2	液流电池双极板材料的种类 .....	103

5.3.3	液流电池双极板的特性及表征 .....	104
5.3.4	电极-双极板一体化 .....	106
5.4	离子传导隔膜材料 .....	107
5.4.1	液流电池用离子传导隔膜材料的分类 .....	108
5.4.2	全钒液流电池离子传导隔膜材料 .....	110
5.4.3	液流电池用离子传导隔膜材料的制备及性能 .....	117
5.4.4	离子传导隔膜材料的改性与优化 .....	124
5.5	电解质溶液 .....	129
5.5.1	液流电池电解质溶液的分类 .....	129
5.5.2	液-液型液流电池性能的影响因素 .....	148
5.5.3	水和钒离子迁移规律 .....	153
	参考文献 .....	161

## 第 6 章

165

### 液流电池电堆、系统及管理控制

6.1	电堆结构与设计 .....	165
6.1.1	电堆结构 .....	165
6.1.2	电堆设计 .....	168
6.1.3	液流电池模拟研究方法及进展 .....	171
6.2	液流电池系统 .....	179
6.2.1	液流电池系统组成 .....	179
6.2.2	液流电池系统设计 .....	180
6.3	液流电池系统管理 .....	183
6.3.1	液流电池系统的管理作用 .....	183
6.3.2	液流电池系统的管理策略 .....	184
6.3.3	液流电池系统的安全保护 .....	184
6.3.4	液流电池系统的故障诊断 .....	185
	参考文献 .....	186

## 第 7 章

187

### 沉积型液流电池

7.1	概述 .....	187
7.2	锌沉积电极 .....	188
7.2.1	锌电极的反应 .....	189
7.2.2	锌电极的钝化 .....	190
7.2.3	锌电极的枝晶 .....	191
7.2.4	锌电极的腐蚀 .....	193
7.3	锌/溴液流电池 .....	193
7.3.1	锌/溴液流电池技术原理 .....	193
7.3.2	锌/溴液流电池技术研究进展 .....	194
7.3.3	锌/溴液流电池技术应用 .....	197

7.4 锌/镍液流电池 .....	201
7.4.1 锌/镍液流电池技术原理 .....	201
7.4.2 锌/镍液流电池镍电极 .....	201
7.4.3 锌/镍液流电池技术研究进展 .....	202
7.5 锌/铈液流电池 .....	206
7.5.1 锌/铈液流电池技术原理 .....	206
7.5.2 铈电极 .....	206
7.5.3 锌/铈液流电池电解液 .....	208
7.6 全沉积型铅酸液流电池 .....	208
7.6.1 全沉积型铅酸液流电池技术原理 .....	208
7.6.2 全沉积型铅酸液流电池技术研究进展 .....	209
参考文献 .....	210

## 第 8 章

### 液流电池的应用

212

8.1 引言 .....	212
8.2 大规模储能设备的技术要求 .....	213
8.3 电力系统削峰填谷 .....	220
8.4 应急备用电站 .....	224
8.5 电动车充电站 .....	226
8.6 通信基站 .....	228
8.7 高能耗企业备用电源 .....	228
8.8 液流电池技术的产业化挑战 .....	228
参考文献 .....	229

# 第1章

## 能源与储能

### 1.1 能源概述

纵观历史发展,能源利用技术的发明改变了人类的生产和生活方式,能源利用技术的每一次变革和创新,都伴随着社会生产力的快速进步、人类生活质量的大幅度改善与人类生存环境的巨大变化。概括而言,人类社会对能源的利用经历了四次革命。火的利用是人类的第一次能源革命,在漫长的人类社会发展过程中,火的发明使人类掌握了利用薪柴做饭、取暖与防卫。化石能源(如煤炭、石油)的利用是人类第二次能源革命。从18世纪初,煤炭资源的发现和开采及燃煤蒸汽机技术的发明使人类社会步入工业文明。19世纪中期,石油的大规模开采和使用,带来了一次工业革命。内燃机、汽车、飞机等新发明、新技术的出现,改变了人类社会的生产和生活方式。发电机的发明是人类能源利用的一次革命。20世纪40年代,以可控核反应堆的发明为标志,拉开了第三次能源革命序幕。1973年第一次石油危机的发生,预示着石油时代将终结,以及一场新的能源革命即新能源革命即将开始。人类对化石能源短缺和枯竭的预期,以及全球气候变化的现实威胁,清洁能源、可再生能源利用的呼声日渐高涨,其目的是以新能源和可再生能源(包括水能、生物质能、太阳能、风能、地热能、海洋能等)逐步代替化石能源,保证人类能源的可持续供应和生存环境的友好。人类社会对能源利用的第四次革命即新能源革命已经开始。

能源可分为一次能源和二次能源。一次能源是指自然界中存在的未经转换的能量资源,包括化石能源(如煤炭、石油、天然气、油页岩、页岩气、煤层气等)和非化石能源(如水能、风能、太阳能、地热能、温差能、波浪能、潮汐能等)。二次能源是指将一次能源加工转换而生成的能源,主要包括电能、氢气、蒸汽、煤气、乙醇、液化石油气、汽油、煤油、柴油、重油等。

另外,以自恢复特性及可持续利用特性来分类,能源又可分为非可再生能源与可再生能源两大类。非可再生能源主要包括化石能源(如煤炭、天然气、石油等)及核能等。非可再生能源使用后,很难在短期内重现再生。可再生能源主要包括水能、风能、太阳能、地热能、温差能、波浪能、潮汐能等,可再生能源在自然界中可以反复重现。

图1-1给出了全球一次能源需求统计及趋势预测,煤炭、石油、天然气等非可再生能源构成了当今世界能源消费的主体。然而,有限的非可再生能源无法保证人类持续发展的需要。据统计,2009年全球消费一次能源总量为12132 Mtoe(百万吨油当量,折合 $1.41 \times 10^6$ 亿千瓦时),而在1980年该数字仅为7219 Mtoe<sup>[1]</sup>。据预测,按当前的消费速度和探明储量,全球的原油与天然气将分别在40年和60年后枯竭。此外,化石能源在使用过程中,排放大量硫化物、氮化物及温室气体CO<sub>2</sub>。科学家的研究表明,燃烧化石能源引起的有害气体和温室气体大量排放,导致了全球气候恶化、极端天气现象发生频率加剧。

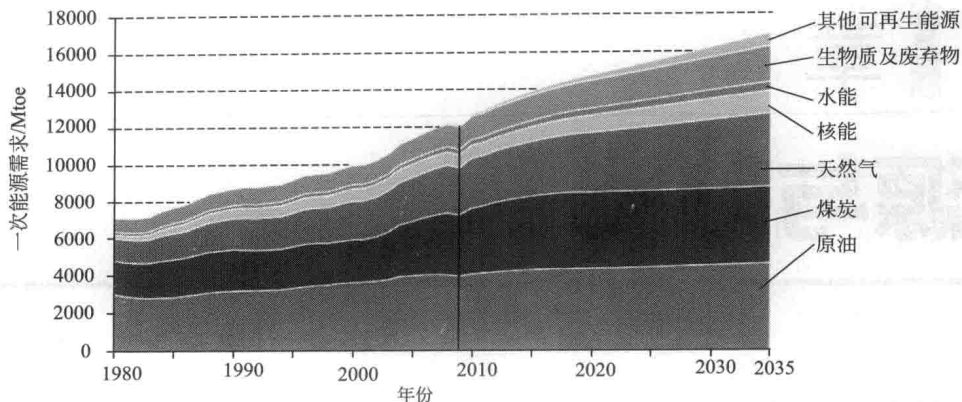


图 1-1 全球一次能源需求统计及趋势预测 (统计数据截至 2009 年)<sup>[1]</sup>

## 1.2 风能、太阳能可再生能源发电的发展现状

太阳每年辐射巨大的能量到达地球表面，尽管说法很多，但具体统计数据不统一。据估算，地球每年接收的太阳能总量为  $1 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$  ( $3.6 \times 10^{25} \text{ J}$ )，我国陆地表面每年接收的太阳辐射能约为  $50 \times 10^{15} \text{ MJ}$ <sup>[2]</sup>，1971~2000 年我国陆地表面年均接收太阳总辐射量相当于 1.7 万亿吨标准煤。

图 1-2 是 2004 年发布的全球能源需求及能源结构预测结果<sup>[1]</sup>，随着社会的发展，对能源的需求量逐年增加。在能源结构方面，2030 年之前，石油、煤炭、天然气的供应量逐渐增加，2030 年以后，石油、煤炭、天然气的供应量逐渐减少，可再生能源的比重逐年增加。可再生能源逐渐由辅助能源转变为主导能源。到 2050 年，风能、太阳能等可再生能源在欧洲能源结构中的比例将超过 50%。

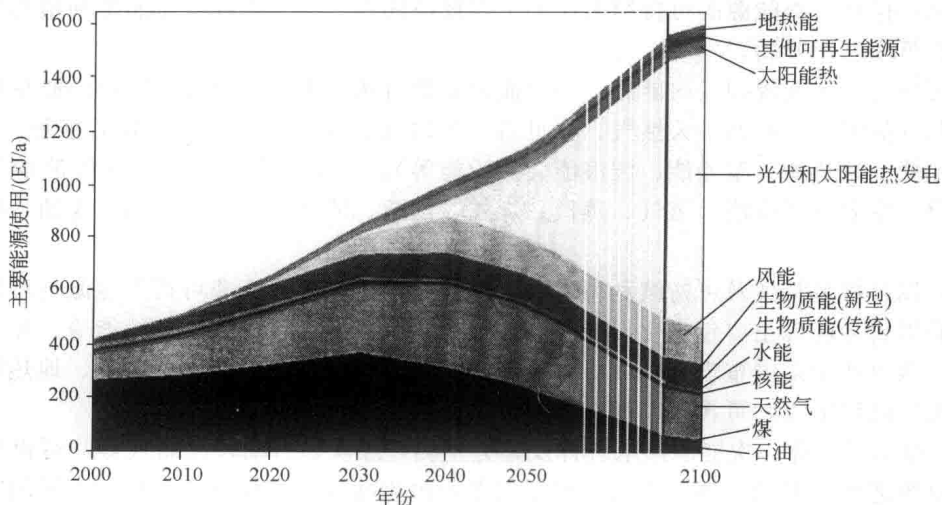


图 1-2 全球能源需求及能源结构预测结果 (2004 年)<sup>[1]</sup>

由传统产业向战略新兴产业转型是我国经济持续发展的重要途径。我国“十二五”规划制定了包括节能环保、新材料、新能源、新能源汽车、高端装备制造、生物、新一代信息在内的七项优先发展的战略新兴产业。其中节能环保、新材料、新能源、新能源汽车产业都与可再生

能源技术与储能技术密切相关。新能源产业将会成为今后经济新的增长点。

广泛利用可再生能源(如太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热能等),提高其在能源消费中的比重,是社会进步发展的必然趋势,也是解决能源资源、能源安全的重要途径。近年来,世界各国对风能、太阳能、海洋能等可再生能源的开发利用越来越重视。为了满足人们生产及生活的用电需求,缩减发电站的建设规模,减少投资,提高效率,以及调控可再生能源系统发电和用电时差,保证稳定供电,开发应用大规模高效储能技术是实现未来能源体系变革的基础,是构建智能电网的重要环节。日本福岛大地震引起的核电站事故使得更多的国家加快了普及应用可再生能源的步伐。可再生能源的进一步发展面临着电网接入和消纳问题,使其在能源和电力构成中始终不能占据较大份额。储能技术在很大程度上能够解决新能源发电的随机性、波动性问题,可以实现新能源发电的平滑输出,使大规模可再生能源发电友好可靠地并入电网,实现能源体系的平稳变革。

各国政府高度重视可再生能源的普及应用,制定了相应的发展规划。德国政府决定,到2020年,可再生能源在整个能源消费中占到35%,到2030年达到50%,到2050年将达到80%。美国能源信息署推测,到2030年,美国电力供应量约40%来自于可再生能源发电。到2020年,日本可再生能源消费将占到总电力消费的20%,2030年将达到34%。我国政府在2006年宣布,到2020年,我国可再生能源在全部能源消费中将达到15%。由此可见,可再生能源正在由辅助能源逐渐转为主导能源。

中国能源资源总量比较丰富,煤炭占主导地位,目前已探明的石油、天然气资源相对不足,油页岩、煤层气等非常规化石能源储量潜力较大。水力资源理论蕴藏量折合年发电量为6019万亿千瓦时,相当于世界水力资源总量的12%,居世界首位<sup>[7]</sup>。但中国人口众多,人均能源资源拥有量在世界上处于较低水平。石油、天然气人均资源量仅为世界平均水平的1/15左右,耕地资源不足,只是世界人均水平的30%<sup>[3]</sup>,制约了生物质能源的开发。中国能源资源的另一个特点是分布不平衡,总体上是西多东少,北多南少。煤炭资源主要分布在华北、西部地区,水力资源主要分布在西南地区,石油、天然气资源主要分布在东、西部地区和海域。而中国主要的能源消费地区集中在东南沿海经济发达地区,资源与能源消费地域存在较为明显的差别。大规模、长距离的北煤南运、北油南运、西气东输、西电东送,是中国能源流向的显著特征和能源运输的基本格局。而且中国的化石能源难以满足到2030年以后经济发展的需要。

化石能源的日益匮乏和环境的日趋恶化,极大地推进了风能、太阳能等可再生能源产业的快速发展。风力发电作为可再生能源技术中发展最快的技术之一,在近十年来取得了突飞猛进的发展。在我国,风电近几年也同样呈现快速增长的趋势,截至2011年8月底,我国风电装机容量达到3924万千瓦,成为全球风电装机规模第一大国。到2020年,我国的风能发电装机容量将达到1.5亿千瓦,太阳能发电将达到2000万千瓦<sup>[4]</sup>。

太阳能、风能发电因受时间、昼夜、季节等因素影响,具有明显的不连续、不稳定及不可控的非稳态特性。而且风力发电输出功率特性与负荷特性差别也较大,通常白天风小,夜间风大,夏天风小,冬天风大,具有明显的反调峰特性。大规模风电并网,由于风力发电输出功率的波动导致电网系统的稳定运行受到影响,必须配置相应的有功调节能力的电力储存设备,以保障电网系统的安全可靠运行。目前电网采取部分火电机组停机/启动和弃风进行电网调峰,增加了运行成本,浪费了风力资源。我国以煤电为主的电力结构长期难以改变,电力品种单一,调峰手段有限,风电的大规模发展不仅进一步加重了电网系统调峰的困难,而且电网运行经济性也大幅度降低。风力发电的非稳态特性还会对电网的电压、频率、谐波等电能质量造成不良影响,严重时危害电网负荷的安全稳定运行。特别是当风电装机容量占电网总装机容量比例越来越高时,风力发电并网的非稳态特性就更容易对电网及用电负荷的安全运行造成不良冲击。在目前电网调峰能力有限的情况下,只能采用弃风手段来保证电网的安全运行,这样不

仅浪费了大量风力资源，而且降低了风电场的经济效益。各地风电场的风力大小和变化规律不同，因此，风力发电的输出变化也不同。而且不同地区的用电负荷变化也不尽相同。通过在风力发电侧合理配置适当规模电池储能系统，可以有效发挥储能电站对风力发电的调幅、调频作用，实现平抑风电功率波动，提高风力发电的可预测性和可调度性，减少大规模风电并网对电网的不利影响，提高风能发电的利用效率。下面就近年来国内外太阳能发电和风能发电的发展情况加以介绍。

### 1.2.1 光伏电池发电发展现状

2011年是太阳能光伏电池市场迅猛发展的一年，全球范围内约有30GW装机容量投入运行，使太阳能光伏发电装机容量总量上升了74%，全球太阳能光伏发电装机容量达到70GW<sup>[5]</sup>。图1-3给出了REN21（Renewable Energy Policy Network for the 21st Century）统计的1995~2011年期间，全球太阳能光伏电站总装机容量的变化<sup>[11]</sup>，自2006年以来，全球太阳能光伏发电装机容量的增速明显加快。

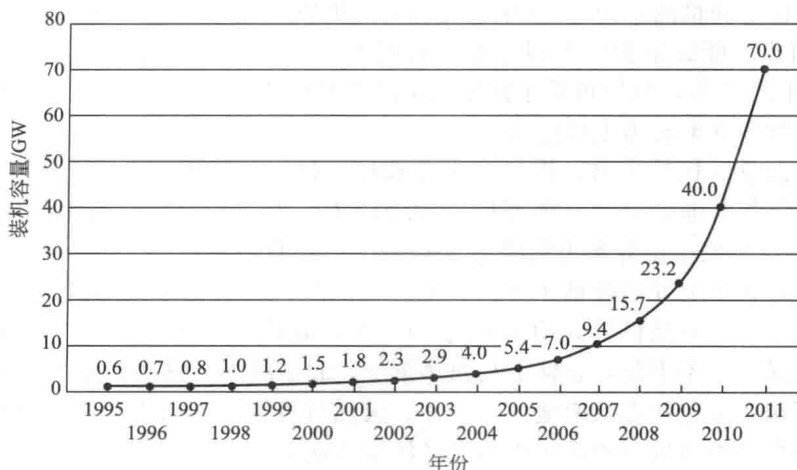


图 1-3 1995~2011 年全球太阳能光伏电站总装机容量<sup>[11]</sup>

在2011年，太阳能光伏发电装机容量增幅超过1GW的国家有6个，太阳能光伏发电总装机容量前5位的国家为德国、意大利、日本、西班牙和美国，而太阳能光伏发电人均装机容量排名领先的国家是德国、意大利、捷克、比利时和西班牙<sup>[6]</sup>。欧盟再次主导全球太阳能光伏发电市场，仅意大利和德国这两个国家就占了2011年新增太阳能光伏发电总量的57%。欧盟2011年新装机约17GW，入网接近22GW，到2011年末总装机容量达51GW，约占全球的3/4，其中投入运行部分能够满足超过1500万欧洲居民的用电需求（图1-4）。同时，太阳能光

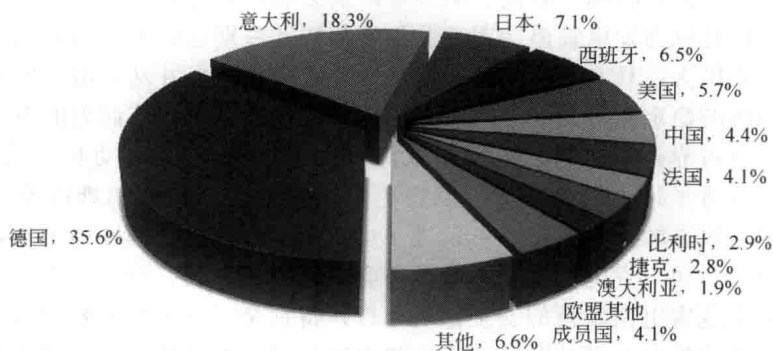


图 1-4 2011 年太阳能光伏发电运行总量前 10 位国家<sup>[11]</sup>

光伏发电量占2011年欧盟新能源总量的47%，超越了其他形式的可再生能源<sup>[7]</sup>。

除欧洲之外，中国、美国、日本和澳大利亚的增长也很快，分别为2.1GW、1.9GW、1.3GW和0.8GW<sup>[6]</sup>。日本太阳能光伏发电运行总量居世界第三位。在美国，价格和各种政策因素使光伏总产能翻倍，达到4GW<sup>[6]</sup>。其中，加利福尼亚州居首（占总量的29%），而后是新泽西州（17%）和亚利桑那州（15%）<sup>[8]</sup>。在应用领域，工业占最大份额（43%），其次是公用事业（41%）和住宅用光伏（16%）。中国的位次从第八位上升至第六位，2011年其光伏产能翻了两番，总量达到3.1GW，成为亚洲地区的主要光伏市场，支撑了2011年该地区50%的需求<sup>[9]</sup>。

太阳能光伏发电项目不仅数目增加，其规模也不断扩大。截至2012年3月，欧洲、北美和亚洲至少有12个国家已出现了规模超过20MW的光伏电站项目。德国更是处于领先地位，甚至出现了1.1GW的超大项目，而西班牙和美国分别实施了480MW和338MW的建设项目<sup>[10]</sup>。中国也实施了较大规模的太阳能光伏发电项目，如中国青海的200MW项目<sup>[11]</sup>，以及2011年初入网运行的西藏10MW项目，该项目为目前全球最大的入网光伏项目<sup>[12]</sup>。此外，建筑一体化太阳能光伏发电（BIPV）项目的发展势头也很好，尽管经济因素影响了其施工和建设进度，但2010年此类项目新增1.2GW，全球BIPV年均增长率达到了56%。

过去十年间，太阳能光伏电池生产的领先者已由美国相继转向日本和欧洲，现在正转向中国。截至2011年，全球排名前15位的太阳能光伏电池制造商中有11个来自亚洲国家和地区，其中9个来自中国大陆和中国台湾。2011年，中国大陆和中国台湾的太阳能光伏电池产能占全世界的61%（2010年为50%），而欧洲和日本分别降至14%和5%。美国的硅片和电池产能也都有所下降，但电池模块产量保持平稳，太阳能光伏电池产量占市场份额降至4%，其中32%为薄膜电池<sup>[6]</sup>。

中国国家能源局2012年2月16日在其官网公布，2011年，全球新增太阳能发电装机容量约2800万千瓦，同比新增1100万千瓦，相当于2009年底以前全球太阳能发电累计装机容量。截至2011年底，全球太阳能发电累计装机容量达到6900万千瓦。我国2011年新增太阳能发电装机容量约220万千瓦，当年新增量位居世界第三位，占全球太阳能发电新增装机容量的7%左右<sup>[13]</sup>。《2012—2016年中国太阳能光伏发电产业投资分析及前景预测报告》指出，截至2011年底，中国太阳能光伏发电累计装机容量达300万千瓦<sup>[14]</sup>。

## 1.2.2 风能发电发展现状

2011年全球新增风能发电装机容量为40GW，高于其他任何可再生能源，使风能发电总装机容量提高了20%，达到238GW（图1-5）<sup>[6]</sup>。前10位国家拥有的风能发电装机容量约占

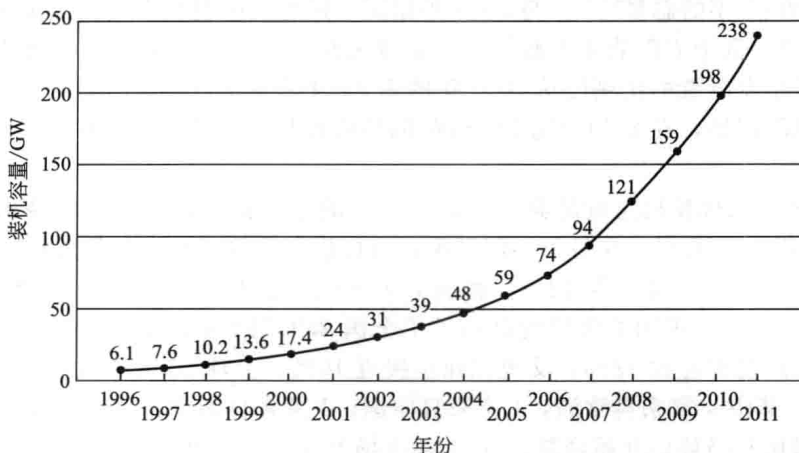


图 1-5 1996~2011 年全球风能发电总装机容量



全球总量的 87%，新增容量最多的国家是中国、美国、印度、德国、英国以及加拿大。欧盟占全球风能发电市场的 23%和总产能的 41%。

2011 年中国风电新装机容量为 17.6GW，约占全球市场的 44%，但略低于 2010 年，使 2011 年成为中国新增风能发电装机容量首次下降的年份（图 1-6）<sup>[6]</sup>。其主要原因在于政府在一些风电场出现问题后对新项目的审批更加严格。即便如此，截至 2011 年末，中国风电装机总量已接近 62.4GW，超过全球总量的 1/4，是 5 年前的 24 倍多。2011 年，中国风电装机容量超过 1GW 的省区有 13 个，其中内蒙古约占 28%，其后依次是湖北（11%）、甘肃（8.7%）和辽宁（8.4%）。

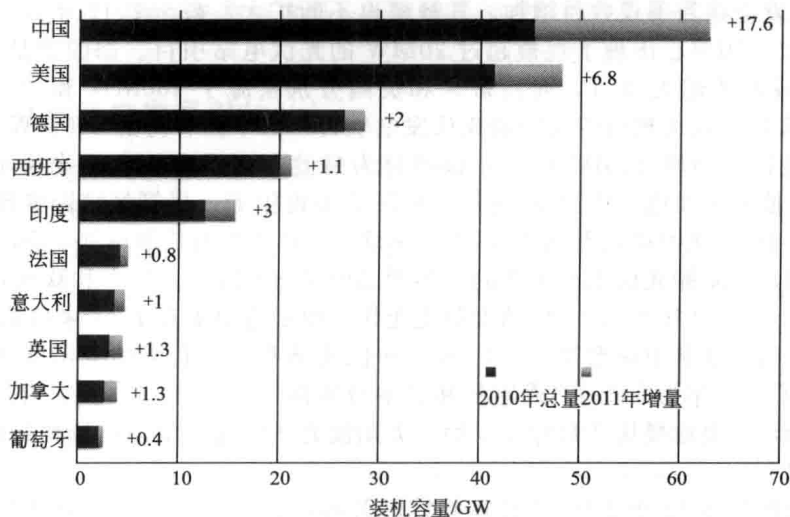


图 1-6 2011 年风电装机容量前 10 位国家

美国 2011 年新增风能发电装机容量为 6.8GW，可以满足 200 万美国家庭的用电需求，使美国风能发电装机总量达到 47GW。如此强劲的发展势头源于联邦政府一些主要优惠政策即将到期，风电企业纷纷赶末班车。得克萨斯州有接近 10.4GW 的风能发电装机容量，超过整个美国总量的 1/5<sup>[15]</sup>。2011 年新增装机容量最多的州依次为加利福尼亚州（920MW）、伊利诺伊州（693MW）和艾奥瓦州（647MW）<sup>[15]</sup>。自 2007 年以来，风能发电已占美国新增发电量的 35%，超过煤电与核电总和的 2 倍。

欧盟 2011 年新增风能发电装机容量约 9.6GW，使该地区的风能发电装机总量接近 94GW（相当于全世界 2007 年的总量）<sup>[6]</sup>。与 2010 年相同，风能发电装机容量占欧盟地区新发电量的第三位（21.4%），低于太阳能和天然气<sup>[7]</sup>。但越来越多的欧盟国家在实施风能发电项目，风能发电占该地区总发电量的比例已从 2000 年的 2.2% 上升到 2011 年末的 10.5%<sup>[7]</sup>。德国是欧盟地区最大的风能市场，在 2011 年新增 2GW 的装机容量，总量达 29.1GW，风能发电量达到 46.5TW·h<sup>[16]</sup>。

2011 年末全球风机装机总量足够支撑 2%~3% 的电能消耗，而欧盟的装机容量则可满足该地区 6.3% 的用电需求<sup>[7]</sup>。在另外一些国家，风机供电比例更高，如丹麦接近 26%，西班牙 15.9%，葡萄牙 15.6%，爱尔兰 12%，德国 7.6%<sup>[7]</sup>。德国四个州的上述比例在 2011 年更是高达 46% 以上。2011 年美国的风能发电满足了全国 2.9% 的用电需求，有五个州该比例超过 10%，南达科他州甚至超过 22%，艾奥瓦州也接近 19%。全球 10 大风机制造商占据了全球风机市场的 80%，其中 4 家来自欧洲，4 家来自中国，1 家来自印度，还有 1 家来自美国。

发展大型风机的趋势也开始恢复，2011 年市场上推出的风机平均规模为 1.7MW；近海风机的平均规模为 3.6MW，比 2010 年提高 20%。比较受欢迎的风机规模，在英国是 2.3MW，